www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

17e JAARGANG No. 1, blz. 1-32 JANUARI 1955

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

VREEMDE ATOMEN IN METALEN

door J. D. FAST.

669.017

De titel van dit artikel zal wellicht bij vele lezers reeds associaties opwekken met de talrijke publicaties van dezelfde auteur, die zij zowel in dit tijdschrift als elders hebben kunnen aantreffen. De doorsnede die Prof. J. D. Fast hier onder een bepaald aspect — dat der interstitiële oplossingen — van zijn werkgebied geeft, is de hoofdzakelijke inhoud van de rede, door hem uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van buitengewoon hoogleeraar aan de Technische Hogeschool te Delft op 12 Januari 1955. De rede is hier aangevuld met illustraties en literatuuraanhalingen.

Niet steeds realiseert men zich welk een grote rol metalen in het menselijk leven spelen. De tegenwoordige samenleving is ondenkbaar zonder opwekking en distributie van electrische energie, zonder bereiding en verspreiding van lichtgas en drinkwater, zonder verkeer per auto, trein, stoomschip en vliegtuig, zonder communicatie door middel van boeken en kranten, telegrafie, telefonie, radio, televisie en film. Ondenkbaar ook zonder chirurgie, zonder grote industrieën met veelsoortige machines, apparaten en meetinstrumenten, zonder bruggen, kranen en dokken, zonder electrische lichtbronnen, stofzuigers en schrijfmachines. Stond de techniek echter geen keur van metalen ter beschikking, dan was al het genoemde, en daarmee de samenleving in haar huidige vorm, onbestaanbaar. Dat men reeds in primitievere maatschappijen aan de metalen een centrale plaats toekende, speciaal voor de vervaardiging van wapens, gebruiks- en kunstvoorwerpen en munten, blijkt uit het feit, dat men in de geschiedenis der mensheid een kopertijd, bronstijd en ijzertijd onderscheidt.

Van de ongeveer honderd elementen zijn meer dan twee derden metalen. In de oudheid kende men er nog pas zeven: koper, zilver, goud, kwik, tin, lood en ijzer. Omstreeks 1900 zijn er al veel meer bekend, maar slechts vijf der nieuwelingen hebben zich dan reeds in de rij der technisch toegepaste metalen geschaard: magnesium, zink, aluminium, antimoon en nikkel. Van deze vijf is vooral aluminium van belang, welks productie op grote schaal slechts langs electrolytische weg economisch realiseerbaar is en derhalve moest wachten op de geboorte van de electrotechniek in de tweede helft van de vorige eeuw.

Het bleef aan onze eeuw voorbehouden de grote massa der metallische elementen tot technische toepassing te brengen. Naast het genoemde dozijn gebruikt men in de techniek tegenwoordig o.a. natrium, caesium, beryllium, calcium, barium, cadmium, indium, titaan, zirconium, thorium, germanium, vanadium, niobium, tantaal, chroom, molybdeen, wolfraam, uranium, mangaan en cobalt. Het aantal toegepaste legeringen is door het ter beschikking komen van al deze metallische elementen tot in het bijna onoverzienbare gestegen. De metaalkundige heeft al deze metalen tot ontwikkeling gebracht om tegemoet te komen aan de eisen van een zich steeds uitbreidende techniek; eisen wat betreft smeltpunt, mechanische sterkte, electrische weerstand, magnetische eigenschappen, weerstandsvermogen tegen chemische aantasting.

Hand in hand met en als noodzakelijke voorwaarde voor deze grote ontplooiing ontwikkelde de metaalkunde zich in deze eeuw geleidelijk van empirie tot wetenschap. In haar empirische stadium

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

omvatte zij aanvankelijk slechts de metallurgie (d.i. de bereiding van metalen uit ertsen), de vormgeving door gieten en mechanische deformatie, de warmtebehandeling en de mechanische beproeving. In de vorige eeuw voegde zich daarbij de metallografie, de beschrijving van de structuur der metalen op grond van microscopisch onderzoek. Omstreeks de eeuwwisseling verbetert de situatie aanzienlijk als Bakhuis Roozeboom, wiens eeuwfeest wij kortgeleden gevierd hebben, laat zien hoe de phasenleer van Gibbs op legeringen moet worden toegepast. In deze toepassing van thermodynamische begrippen in de metaalkunde gaat Van Laar vervolgens nog een stap verder, door te demonstreren dat men de eenvoudigste types van binaire toestandsdiagrammen (T, x-diagrammen) geheel kan berekenen indien de mengwarmten en mengentropieën in de vloeibare en de vaste toestand en tevens de smeltwarmten der beide componenten bekend zijn. Het belangrijke werk van Van Laar blijft echter tientallen jaren vrijwel onopgemerkt.

De metaalkundige leert na 1912 atomistisch denken door het pionierswerk van Von Laue en de beide Bragg's. Met behulp van röntgenstralen tonen deze onderzoekers aan dat alle kristallen, dus ook de kristallen waaruit de metalen zijn opgebouwd, ordelijke, periodieke stapelingen van atomen zijn; zij laten tevens zien dat de afstanden tussen de atomen in deze stapelingen quantitatief kunnen worden bepaald. Dit structuuronderzoek is en wordt in vele laboratoria voortgezet en heeft een nieuw licht geworpen op de phasendiagrammen.

Aanvankelijk hoopte men alle eigenschappen van een kristallijne stof te kunnen verklaren uit de röntgenografisch gevonden structuur. Men onderstelde dat eventuele plaatselijke afwijkingen van de ideale rangschikking der atomen slechts een geringe invloed op de eigenschappen zouden hebben. Geleidelijk heeft men echter leren inzien dat vele van de meest interessante eigenschappen van kristallijne stoffen juist op afwijkingen van de ideale ordening berusten. Dit geldt bijv. voor de plastische vervormbaarheid van metalen, waarvoor volgens de huidige inzichten lijnvormige roosterstoringen, zg. dislocaties, verantwoordelijk zijn. Ook het materietransport (de diffusie) in vaste metalen blijkt op de aanwezigheid van roosterstoringen te berusten. Voor dit verschijnsel zijn bepaalde puntvormige storingen verantwoordelijk, nl. de aanwezigheid van extra atomen tussen de ordelijk gestapelde of het ontbreken van atomen op normale roosterplaatsen.

Naast het tot technische ontwikkeling brengen van nieuwe metalen en legeringen, behoort het tot de taken van de metaalkundige de genoemde roosterstoringen te leren beheersen en bewust aan te wenden ter verbetering van de eigenschappen der metalen. In hetgeen volgt zal een aantal verschijnselen worden besproken die berusten op één der mogelijke afwijkingen van de ideale ordening, nl. de aanwezigheid van extra atomen, zg. interstitiële atomen, in het periodieke rooster.

Voorbeelden van interstitiële oplossingen

Een metaal kan in evenwicht slechts vreemde atomen in zijn interstities opnemen als deze atomen betrekkelijk klein zijn. Dit geldt speciaal voor de atomen van enkele niet-metallische elementen met een laag atoomnummer: waterstof, borium, koolstof, stikstof en zuurstof. De twee laatste elementen hebben een opvallende rol gespeeld in de geschiedenis van de metalen titaan en zirconium. De staven die uit deze metalen werden vervaardigd, waren tot voor ongeveer dertig jaar alle bros, ook de staven die bij chemisch onderzoek een grote zuiverheid vertoonden. Lange tijd werd dientengevolge aangenomen dat brosheid een intrinsieke eigenschap van titaan en zirconium is. Dertig jaar geleden werd echter in Eindhoven een methode gevonden om deze metalen in een zeer ductiele toestand te bereiden [1]). Het ductiele metaal bleek dezelfde kristalstructuur te hebben als het brosse, zodat men gedwongen was aan te nemen dat het laatste één of meer verontreinigingen bevatte waarover de normale chemische analyse geen uitsluitsel had gegeven.

Uit een uitgebreid onderzoek dat naar aanleiding van deze feiten werd uitgevoerd, bleek dat titaan en zirconium tientallen atoomprocenten zuurstof in vaste oplossing kunnen bevatten en dat reeds enkele procenten voldoende zijn om deze metalen hard en bros te maken [2]). Ook stikstof bleek in grote hoeveelheid in beide metalen te kunnen oplossen en in die toestand de mechanische eigenschappen nog ongunstiger te beïnvloeden dan zuurstof. Beide metalloïden worden in atomaire vorm in de grootste interstities (de octaëderholten) van het hexagonale metaalrooster opgenomen. Vooral zuurstof was in ongewenst grote hoeveelheid aanwezig in de titaan- en zirconiumstaven die volgens de oorspronkelijke methode waren gemaakt.

Nu de besproken werking van zuurstof en stikstof bekend is, bestaat in principe de mogelijkheid ze in afgepaste hoeveelheden opzettelijk aan titaan en

---

[1]) J. H. de Boer en J. D. Fast, Z. anorg. allg. Chem. **153**, 1-8, 1926.

[2]) J. H. de Boer en J. D. Fast, Rec. Trav. chim. Pays-Bas **55**, 459-467, 1936; J. D. Fast, Metallwirtschaft **17**, 641-644, 1938.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zirconium toe te voegen, ten einde deze metalen geschikt te maken voor toepassingen waarvoor de zuivere metalen te zacht zijn. Men zal dan ofwel de hoeveelheid zuurstof resp. stikstof zo klein moeten kiezen dat de ductiliteit van het metaal niet geheel verloren gaat, ofwel de harding tot oppervlaktelagen moeten beperken.

Ook andere metalen worden door interstitieel opgeloste atomen hard en bros. Een harding door middel van interstitiële atomen heeft men eeuwenlang onbewust toegepast bij de staalharding. Het hardende element is in dit geval koolstof. Bij het hardingsproces wordt dit element in sterk oververzadigde oplossing gebracht, door gebruik te maken van het feit dat zijn oplosbaarheid in de boven 900 °C stabiele ijzerphase (γ-ijzer) veel groter is dan in de beneden die temperatuur stabiele phase (α-ijzer). Titaan en zirconium bezitten bij ongeveer dezelfde temperatuur als ijzer een kristallografisch overgangspunt, maar de bij de staalharding toegepaste kunstgreep is hier onbruikbaar, aangezien

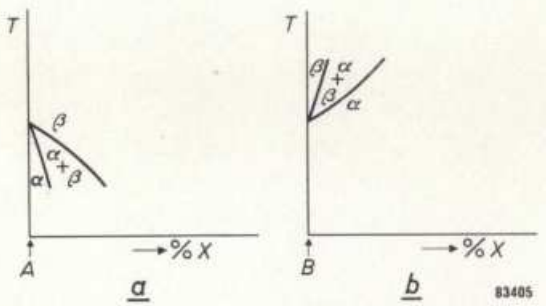


Fig. 1. *a*) Het smeltpunt of een kristallografisch overgangspunt van een component (*A*) wordt door toevoeging van een tweede component (*X*) naar lagere temperaturen verschoven als de oplosbaarheid in de bij lage temperatuur stabiele phase α kleiner is dan in de bij hoge temperatuur stabiele phase β. *b*) Is het omgekeerde het geval (systeem *B*-*X*), dan wordt het smeltpunt of overgangspunt naar hogere temperaturen verschoven.

zuurstof en stikstof juist in de bij lage temperatuur stabiele Ti- en Zr-phase veel beter oplossen dan in de bij hoge temperatuur stabiele phase. Hetzelfde geldt voor koolstof, die overigens in beide metalen een veel geringere oplosbaarheid bezit dan zuurstof en stikstof.

Deze omgekeerde invloed van de kristallografische overgang op de interstitiële oplosbaarheid komt in de binaire phasendiagrammen Fe-C, Fe-N aan de ene kant en Ti-O, Ti-N, ... aan de andere kant, onmiddellijk daarin tot uiting dat de aanwezigheid van de interstitiële atomen de kristallografische overgang van Fe naar lagere, die van Ti (Zr) naar hogere temperaturen verschuift. Dit is schematisch weergegeven in *fig. 1*. Van twee van de ter

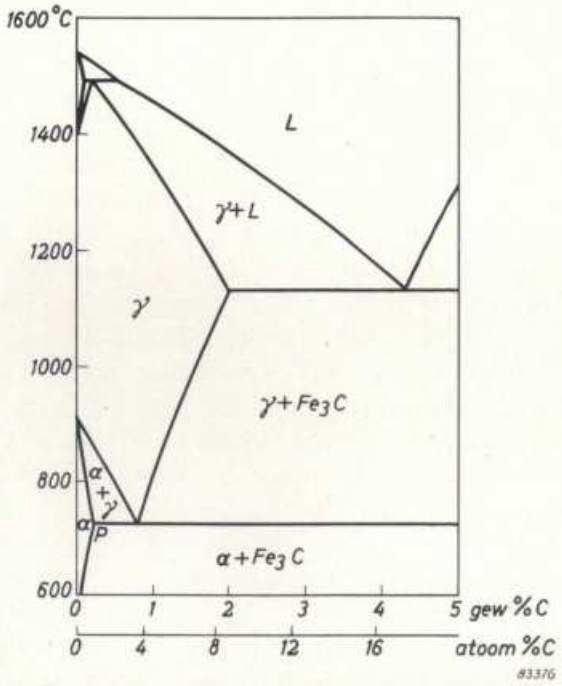


Fig. 2. Een gedeelte van het phasendiagram ijzer-koolstof. Voor de overzichtelijkheid is het punt *P* te ver naar rechts getekend: in werkelijkheid bedraagt de met dit punt corresponderende maximale oplosbaarheid van koolstof in α-ijzer slechts 0,02 gew. %. *L* is de vloeibare phase. In tegenstelling tot fig. 1 wordt bij ijzer de bij hogere temperatuur (boven 900 °C) stabiele phase niet als β- doch als γ-phase aangeduid; dit is historisch ontstaan doordat men vroeger ten onrechte meende dat de overgang van ijzer bij ca. 760 °C van de ferromagnetische naar de paramagnetische toestand gepaard zou gaan met een overgang in een andere phase, die men toen de β-phase noemde.

sprake gekomen binaire systemen, nl. van de systemen Fe-C en Zr-O, geven de *figuren 2* en *3* een groter gedeelte van het phasendiagram.

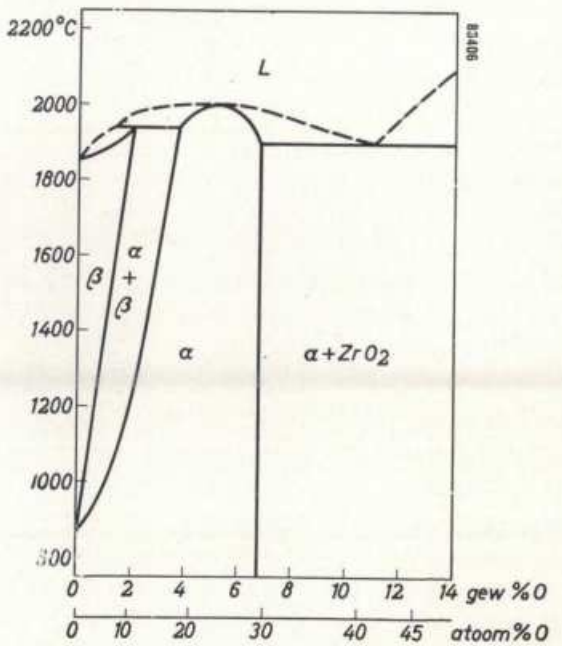


Fig. 3. Een gedeelte van het phasendiagram zirconium-zuurstof. (Volgens Domagala en McPherson, J. Metals **6**, 238-246, 1954.)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Factoren die de interstitiële oplosbaarheid bepalen

De hierboven genoemde feiten schijnen te wijzen op een verband tussen de grootte der beschikbare interstities en het oplossend vermogen voor koolstof, zuurstof en stikstof. De γ-phase van ijzer heeft nl., blijkens haar röntgenografisch bepaalde kristalstructuur, grotere interstities dan de α-phase en tevens een groter oplossend vermogen voor koolstof en stikstof, terwijl in het geval van Ti en Zr juist de bij lage temperatuur stabiele modificatie grotere interstities en een groter oplossend vermogen voor C, N en O heeft. De invoering van een C-, N- of O-atoom in een interstitie van een metaal gaat met een aanzienlijke plaatselijke oprekking van het rooster gepaard. Naarmate de interstitie relatief kleiner is, zal het rooster bij de invoering van het vreemde atoom meer gedeformeerd worden en zal de op te brengen deformatie-energie groter zijn. Deze grotere deformatie-energie leidt in de beschouwde gevallen tot een kleinere oplosbaarheid van de interstitiële bijmengsels.

Het is verleidelijk het voorgaande te generaliseren en te onderstellen dat er een algemeen geldend verband zal bestaan tussen de interstitiële oplosbaarheid van vreemde atomen aan de ene en de verhouding van hun grootte tot die der interstities aan de andere kant. Een nadere overdenking leert dat deze onderstelling van een door uitsluitend „sterische" factoren bepaalde oplosbaarheid niet met de werkelijkheid kan overeenstemmen. Zelfs als we afzien van het feit dat de bij het oplossen optredende veranderingen in de entropie mede-bepalend zijn voor de oplosbaarheid, moeten we terdege rekening houden met het optreden van een electronische wisselwerkingsenergie naast de elastische deformatie-energie, en met de invloed van de stabiliteit der coëxisterende phase die als bron van de interstitiële atomen fungeert. Wij zullen deze beide factoren aan een korte beschouwing onderwerpen.

De invloed van de electronische wisselwerking uit zich bijv. in het feit dat heliumatomen, die kleiner zijn dan koolstof- of stikstofatomen maar een zeer stabiele configuratie van twee gepaarde electronen hebben, in geen enkel metaal oplossen. De voorwaarde dat de interstitiële atomen betrekkelijk klein moeten zijn, is dus wel een noodzakelijke, maar geen voldoende voorwaarde. De oplossingsenergie (oplossingswarmte) kan in ruwe benadering worden geschreven als de som van de elastische deformatie-energie, die steeds positief is (absorptie van warmte bij isotherm oplossen), en de electronische wisselwerkingsenergie, die zowel positief als negatief kan zijn. Strikt genomen is deze verdeling van de oplossingsenergie in twee stukken niet geoorloofd, aangezien de wisselwerkingsenergie sterk van de interatomaire afstanden en daarmee van de deformatie-energie afhangt. Voor vele beschouwingen blijkt zij echter zeer nuttig te zijn. Kortheidshalve zullen wij de twee termen verder veelal als sterische energie en chemische energie aanduiden. Een typisch voorbeeld van een geval waarin de chemische energie een belangrijker rol speelt dan de sterische energie, is de oplosbaarheid van zuurstof in koper, zilver en goud. De in aanmerking komende interstities zijn in zilver en goud groter dan in koper, maar het oplossend vermogen voor zuurstof van een gegeven druk neemt in de volgorde Cu, Ag, Au af, in overeenstemming met de afnemende affiniteit tot zuurstof [3]).

De invloed van de stabiliteit der coëxisterende phase komt bijv. duidelijk naar voren bij het vergelijken van de oplosbaarheden van koolstof, stikstof en zuurstof in ijzer. Hoewel de grootte van de atomen C, N en O in de genoemde volgorde afneemt, is de oplosbaarheid van zuurstof in de beide modificaties van ijzer, bij aanwezigheid van FeO als tweede phase, aanzienlijk geringer dan die van stikstof en koolstof, bij aanwezigheid van Fe_4N resp. Fe_3C als tweede phase. Dit berust ongetwijfeld voor een aanzienlijk gedeelte op de grotere stabiliteit der ijzeroxydes vergeleken met die der nitrides en carbides.

De sterische factor

Een treffend beeld van de grote invloed der sterische energie verkrijgt men door het bestuderen van de werkingen van koolstof en stikstof in ijzer. Op grond van uitsluitend sterische beschouwingen blijkt het mogelijk het verband te zien tussen vele in technisch staal, zg. vloeistaal, optredende verschijnselen, die bij een oppervlakkige beschouwing weinig of niets met elkaar te maken schijnen te hebben. Een van deze verschijnselen, nl. de grotere oplosbaarheid van koolstof en stikstof in γ-ijzer, vergeleken met die in α-ijzer, kwam hiervóór reeds ter sprake. De invloed van de sterische energie manifesteert zich ook bij elke vervorming van het rooster, die een gedeelte van de interstities vergroot, een ander gedeelte verkleint. Een dergelijke vervorming leidt een wijziging in de verdeling der opgeloste C- of N-atomen in, waarbij de bezetting der verkleinde interstities af-, die der vergrote interstities toeneemt. De daling der entropie, die met dit afwijken van de statistische verdeling gepaard gaat, wordt overgecompenseerd door de gelijktijdige daling van de energie, zodanig dat de vrije energie door de herverdeling daalt.

[3]) J. L. Meijering, Acta Metallurgica, in druk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Vervorming door inwendige spanningen

Vervormingen van het rooster, die tot herverdeling leiden, kunnen zowel door inwendige als door uitwendige spanningen veroorzaakt worden. Een bekende bron van inwendige spanningen vormen de dislocaties, de hiervóór reeds genoemde lijnvormige roosterstoringen, op wier aanwezigheid de gemakkelijke plastische vervormbaarheid der metalen berust. Het ijzerrooster is aan één zijde van het glijvlak dat bij een lijndislocatie behoort, uitgerekt, aan de andere zijde samengedrukt (zie *fig. 4*). De deformatie neemt snel af met toenemende afstand tot de dislocatie. Het inbrengen van een C- of N-atoom in een vergrote interstitie van de gerekte zone zal een kleinere deformatie-energie vereisen dan het inbrengen in een normale interstitie. Opgeloste C- of N-atomen die door diffusie in de gedilateerde zone terechtkomen, zullen deze bij lage temperaturen, bijv. kamertemperatuur, niet meer kunnen verlaten. Bij aanwezigheid van genoeg C- of N-atomen in het rooster vormen zich aldus op den duur ketens van interstitiële atomen, die zich over de gehele lengte van elke lijndislocatie uitstrekken. De vorming van deze ketens of strengen heeft een grote invloed op de plastische eigenschappen bij gewone temperatuur, omdat aan de plastische vervorming (bijv. in de trekproef) een losmaken van de dislocaties van de atoomstrengen vooraf moet gaan. Deze scheiding brengt het metaal in een toestand van grotere energie,

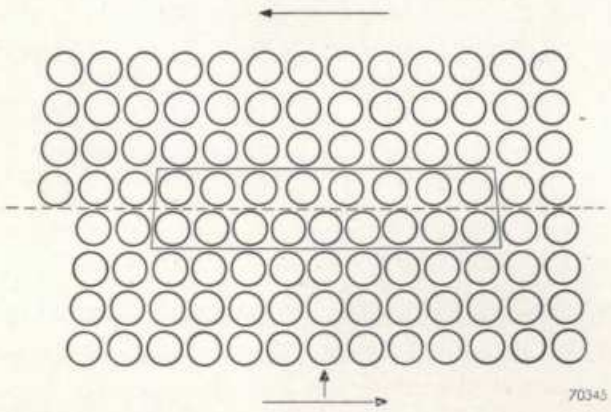


Fig. 4. Geschematiseerde voorstelling van een dislocatie in een enkelvoudig kubisch metaalrooster. De dislocatie is een loodrecht op het vlak van tekening staande, lijnvormige roosterstoring, waarvan hier de invloed in één atoomlaag getoond wordt (zie het omlijnde gebied). De stippellijn stelt het vlak voor waarin afschuiving plaats kan vinden.

aangezien de opgeloste atomen zich na de scheiding in normale interstities bevinden. Het in beweging brengen der dislocaties vereist dus een extra spanning, die na het losmaken van de strengen C- of N-atomen niet meer nodig is. Men begrijpt zo het optreden van een bovenste en een onderste vloeigrens in de trek-rek-kromme van vloeistaal (*fig. 5*). Onmiddellijk na een geringe plastische vervorming zijn de dislocaties nog vrij; een duidelijke vloeigrens blijkt bij een hernieuwde vervorming te ontbreken (fig. 5*b*). Laat men het materiaal daarna aan zichzelf over, dan diffunderen de C- en N-atomen weer

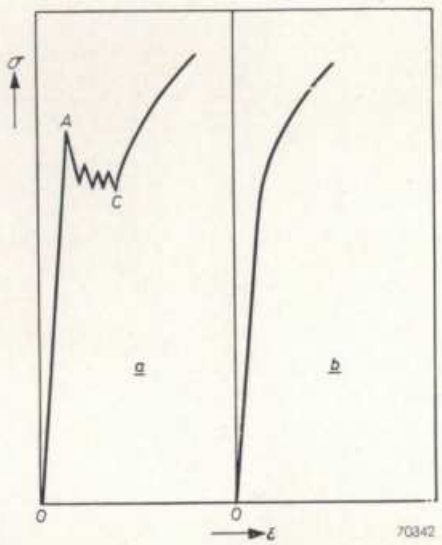


Fig. 5. Trek-rek-krommen van vloeistaal. Uitgezet is de trekspanning σ als functie van de deformatie ε.
a) Het staal vertoont een scherpe bovenste vloeigrens bij *A*. Tot *C* voorgerekt materiaal vertoont bij hernieuwde belasting (*b*) een trek-rek-kromme zonder vloeigrens.

naar de dislocaties, waardoor de bovenste en de onderste vloeigrens terugkeren en het metaal moeilijker vervormbaar (harder) wordt. Men duidt dit spontane proces met de naam vervormingsveroudering aan. De besproken theorie van het optreden van een bovenste en een onderste vloeigrens en van de vervormingsveroudering is afkomstig van de Engelse onderzoeker A. H. Cottrell [4]). Op in Eindhoven uitgevoerde experimenten, die geringe wijzigingen in deze theorie noodzakelijk hebben gemaakt [5]), zal hier niet worden ingegaan.

Vervorming door uitwendige spanningen

Ook uitwendige spanningen kunnen tot een herverdeling der interstitiële atomen in α-ijzer leiden. Dit verschijnsel hangt samen met de asymmetrie der in aanmerking komende interstities. De opgeloste atomen bevinden zich in de octaëderholten van het ijzerrooster, waarvan de centra samenvallen met de middens der ribben en vlakken van de elementaire cel. De kernen van de zes atomen die een octaëderholte in α-ijzer omgeven, vormen de hoekpunten van een niet-regelmatig achtvlak (*fig. 6*).

---

[4]) A. H. Cottrell, Progress in Metal Physics **1**, 77-126, 1949.
[5]) J. D. Fast, Revue de Métallurgie **47**, 779-786, 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een C- of N-atoom in zo'n holte zit daardoor tussen twee der zes ijzeratomen ingeklemd en veroorzaakt een eenzijdige uitrekking in de richting van één der

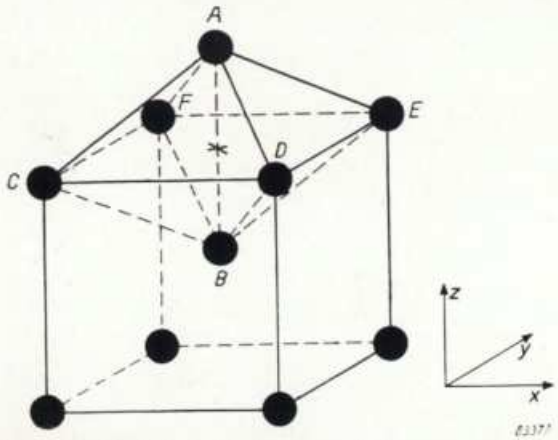


Fig. 6. Het kruisje in de figuur geeft het centrum van een octaëderholte in de elementaire cel van een kubisch ruimtelijk gecentreerd metaal aan. Een dergelijke holte is asymmetrisch: de afstanden CE en DF zijn $\sqrt{2}$ maal zo groot als de afstand AB.

drie assen van de elementaire cel, die we als x-, y- en z-as aanduiden. In overeenstemming hiermee kan men de interstities in drie groepen indelen: x-, y- en z-interstities. In een ongedeformeerd kristal zijn de interstitiële atomen gelijkmatig over deze

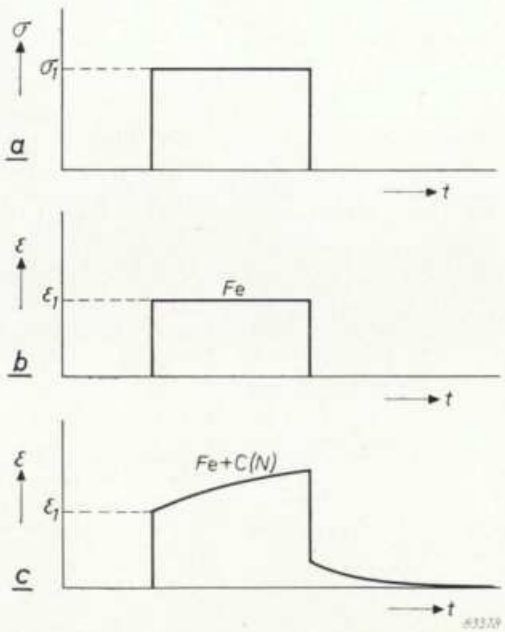


Fig. 7. *a*) Men brengt op een bepaald tijdstip een constante trekspanning σ_1 (die veel kleiner dan de vloeispanning is) in een ijzerkristal aan in de richting van één der kubusassen. *b*) Het metaal reageert hierop onmiddellijk met een bepaalde elastische verlenging ε_1, welke in het geval van zuiver ijzer constant blijft. *c*) Bevat het ijzer opgeloste koolstof of stikstof, dan wordt de plotselinge verlenging ε_1 gevolgd door een veel kleinere, geleidelijk naar een eindwaarde strevende verlenging (nawerking). Heft men op een later tijdstip de trekspanning plotseling op, dan verdwijnt de totale rek bij zuiver ijzer eveneens plotseling; bij C- of N-houdend ijzer treedt dezelfde plotselinge verkorting op, welke wordt gevolgd door het geleidelijk verdwijnen van de extra rek.

plaatsen verdeeld. Dit betekent echter geenszins dat zij vaste plaatsen innemen; hun gemiddelde verblijftijd in een interstitie bedraagt bij kamertemperatuur slechts ongeveer één seconde. Rekt men een kristal in de richting van de x-as elastisch uit, dan treedt een preferentie voor de vergrote x-plaatsen op en het verdelingsevenwicht verschuift zodanig dat de bezetting der x-plaatsen toe-, die der y- en z-plaatsen afneemt. Deze herverdeling kost een zekere tijd en leidt tot een extra verlenging, die na de momentane elastische verlenging optreedt en geleidelijk een eindwaarde nadert (*fig. 7*). De snelheid waarmee dit gebeurt, wordt bepaald door de diffusiesnelheid der opgeloste C- en N-atomen, dwz. door de reeds genoemde sprongfrequentie van ongeveer 1 per seconde bij kamertemperatuur. Men duidt het besproken verschijnsel als elastische nawerking aan. Bij een wisselbelasting leidt zij tot een fazeverschuiving tussen belasting en deformatie en daarmee tot een dissipatie van elastische energie, dwz. tot een demping van vrije trillingen (*fig. 8*).

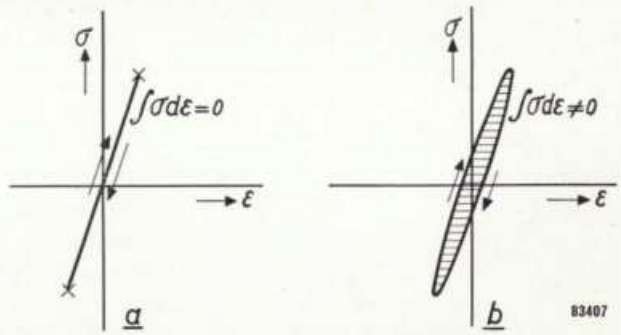


Fig. 8. *a*) Bij periodieke belasting (beneden de vloeigrens) van een lichaam zonder nawerking treedt geen dissipatie van trillingsenergie op. *b*) Vertoont het lichaam daarentegen nawerking, dan gaat de deformatie ε steeds later door haar nulwaarde dan de spanning σ en er is dissipatie van energie, welke door het gearceerde oppervlak wordt gegeven.

De besproken verklaring van de door interstitiële atomen veroorzaakte elastische nawerking en demping werd gegeven door de Eindhovense onderzoeker Snoek [6]). De meting van de Snoek-demping heeft zich in weinige jaren ontwikkeld tot een belangrijk hulpmiddel bij het fundamenteel onderzoek van ijzer en staal. Zij stelt ons in staat de diffusiecoëfficient en oplosbaarheid van koolstof en stikstof in α-ijzer voor verschillende temperaturen met grote nauwkeurigheid te bepalen. Hetzelfde geldt voor de analytische bepaling van geringe hoeveelheden C of N in ijzer en voor de meting van de snelheid waarmee zij uit hun oververzadigde oplossingen in α-ijzer precipiteren.

[6]) J. L. Snoek, Physica **8**, 711-733, 1941; **9**, 862-863, 1942.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ter toelichting van het laatste diene, dat de oplosbaarheid van C en N in α-ijzer bij de temperaturen der dempingsmetingen (in de buurt van kamertemperatuur) vrijwel nul is, zodat de metingen verricht worden aan oververzadigde oplossingen, die door snel koelen vanaf een hogere temperatuur (bijv. 500 °C) worden verkregen. De grootte van de demping neemt bij bijv. 20 °C langzaam af, en de snelheid waarmee dit gebeurt, is een directe maat voor de precipitatiesnelheid, dwz. voor de snelheid van uitkristalliseren van carbide resp. nitride in het inwendige van het α-ijzer.

Magnetostrictieve vervorming

In het voorgaande is nog geen rekening gehouden met de beneden het Curie-punt optredende magnetostrictieve vervorming van het ijzerrooster. Beneden de Curie-temperatuur is het ijzer, ook in de macroscopisch onmagnetische toestand, plaatselijk steeds tot de verzadiging gemagnetiseerd. Treedt geen magnetische werking naar buiten op, dan wil dit slechts zeggen dat de spontane magnetisatie in verschillende gebieden, de zg. Weiss-gebieden, verschillend gericht is. Deze richting valt in spanningsvrij ijzer steeds samen met één der zes richtingen van de ribben der elementaire cel. De magnetostrictie bestaat nu daarin dat het ijzerrooster in de richting van de spontane magnetisatie iets gerekt is ten opzichte van de richtingen loodrecht daarop. Het hiervóór beweerde dat de opgeloste C- resp. N-atomen in spanningsvrij ijzer gelijkmatig over de x-, y- en z-plaatsen verdeeld zijn, geldt daardoor slechts als gemiddelde over een groot aantal Weiss-gebieden. Voor de afzonderlijke gebieden geldt de bewering niet. Wijst de magnetisatievector bijv. in de $+x$- of $-x$-richting, dan treedt een duidelijke voorkeur voor de x-plaatsen op.

Men mag verwachten dat de aanwezigheid van opgeloste C- of N-atomen een grote invloed heeft op de beweeglijkheid van de 90°-Bloch-wanden, dat zijn wanden tussen Weiss-gebieden met loodrecht op elkaar staande magnetisatierichtingen. De verplaatsing van een 90°-Bloch-wand correspondeert met een draaiing over 90° van de magnetisatierichting in het gepasseerde gebied en met een contractie van de interstities waarin de vreemde atomen zich bij voorkeur bevinden (*fig. 9*). Dit veroorzaakt een stijging van de energie. De verplaatsing van een 90°-wand in ijzer dat opgeloste C of N bevat, zal dus een grotere kracht vereisen dan voor zijn verplaatsing in zuiver ijzer nodig is. Het ligt voor de hand te onderstellen dat de beweeglijkheid der 180°-wanden door de aanwezigheid van opgeloste C of N veel minder beïnvloed wordt, aangezien immers de magnetostrictieve deformatie door de verplaatsing van een 180°-wand niet verandert.

De besproken effecten hebben een magnetische nawerking ten gevolge, die volkomen vergelijkbaar is met de eerder besproken elastische nawerking. De figuren 7 en 8 zijn voor kleine veldsterkten ook op het magnetische geval toepasselijk, mits men de spanning σ door de veldsterkte H en de deformatie ε door de inductie B vervangt. Laat bijv. een stuk ijzer, dat enkele duizendsten procent opgeloste C of N bevat, zich in een zwak magnetisch veld bevinden. Heft men het veld op, dan verdwijnt slechts een gedeelte van de inductie vrijwel onmiddellijk; het resterende deel verdwijnt geleidelijk, met een snelheid die wederom door de sprongfrequentie der opgeloste atomen bepaald wordt en dus sterk afhangt van de temperatuur. In een wisselveld heeft de magnetische nawerking een fazeverschuiving tussen veld en inductie ten gevolge, corresponderend met een dissipatie van magnetische energie, die moet worden opgeteld bij de wervelstroom- en hysteresisverliezen.

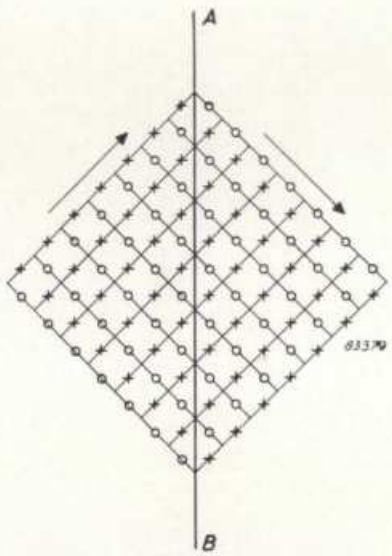


Fig. 9. De lijn AB stelt een 90°-Bloch-wand in α-ijzer voor, die zich loodrecht op het papier naar boven en beneden uitstrekt. De ijzeratomen worden gedacht zich op de hoekpunten van het getekende net te bevinden. De pijlen geven de richtingen van spontane magnetisatie aan. Links van AB zijn de door kruisjes, rechts van AB de door cirkeltjes aangegeven plaatsen de voorkeursplaatsen der interstitiële atomen. Dit hangt samen met een geringe magnetostrictieve rek in de pijlrichting. (In de figuur is geen rekening gehouden met de eindige dikte van een Bloch-wand.)

Stabiliteit van oververzadigde oplossingen

Geordende oplossingen (staalharding)

Wanneer we nu, midden in een betoog over magnetische verschijnselen in ijzer, weer teruggaan tot de reeds eerder genoemde technische staalharding, dan kan het lijken of we van de hak op

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de tak springen. Dit is echter niet het geval, want de verklaring voor de stabiliteit van het geharde staal moet weer gezocht worden in de aard der interstities in α-ijzer, die tot hun onderscheiding in x-, y- en z-interstities leidde.

De plaatselijke, asymmetrische deformatie van het ijzerrooster, die bij invoering van een C- of N-atoom optreedt, heeft ten gevolge dat de invoering van een tweede atoom in bepaalde nabuurholten van dezelfde groep (x, y of z) een geringere deformatie-energie vereist. Het eerste atoom heeft nl. de plaats waar het tweede moet komen, reeds een weinig voorgerekt. Men kan zich dus het optreden van sterk oververzadigde, maar betrekkelijk stabiele oplossingen van C resp. N in α-ijzer voorstellen, mits men erin zou slagen al deze atomen in gelijknamige interstities onder te brengen. Dit is echter juist hetgeen automatisch gebeurt bij de technische staalharding. Men gaat uit van ijzer waarin naast andere elementen veel koolstof, ca. 1 gew.%, aanwezig is en verhit dit op een temperatuur waarbij het metaal zich in de γ-toestand bevindt. Wegens zijn grote oplosbaarheid in de γ-phase gaat daarbij alle koolstof in homogene oplossing (vgl. fig. 2). Vervolgens koelt men het metaal zeer snel af, zo snel dat de door het toestandsdiagram voorgeschreven splitsing in α-kristallen met weinig opgeloste C en ijzercarbide Fe_3C achterwege blijft. Er gebeurt nu echter in de buurt van 200 °C iets anders. Het rooster klapt met grote snelheid in de α-toestand om, en het mechanisme hiervan is zodanig dat alle C-atomen zich na het omklappen in gelijknamige interstities, zeg x-interstities, bevinden. De roosterconstante van het α-ijzer is dientengevolge in de x-richting sterk vergroot, in de y- en z-richting daarentegen verkleind; men duidt dit harde, tetragonaal vervormde α-ijzer met de naam martensiet aan (*fig. 10*). Sprongen van C-atomen tussen ongelijknamige interstities kunnen wegens de tetragonale deformatie en de reeds aangeduide collectief-stabiliserende werking der C-atomen niet optreden. Sprongen tussenge lijknamige interstities zijn niet mogelijk, omdat elke interstitie slechts ongelijknamige buren heeft. Een langzame precipitatie van Fe_3C, zoals optreedt in ongeordende oververzadigde oplossingen, waarin de C-atomen bij kamertemperatuur ongeveer 1 sprong per seconde maken, blijft dus achterwege. Eeuwenoude zwaarden bezitten nog steeds hun grote hardheid, welke op de besproken, geordende, oververzadiging aan koolstof berust.

Een overeenkomstig proces als met koolstof is met stikstof mogelijk, men spreekt dan van stikstofmartensiet.

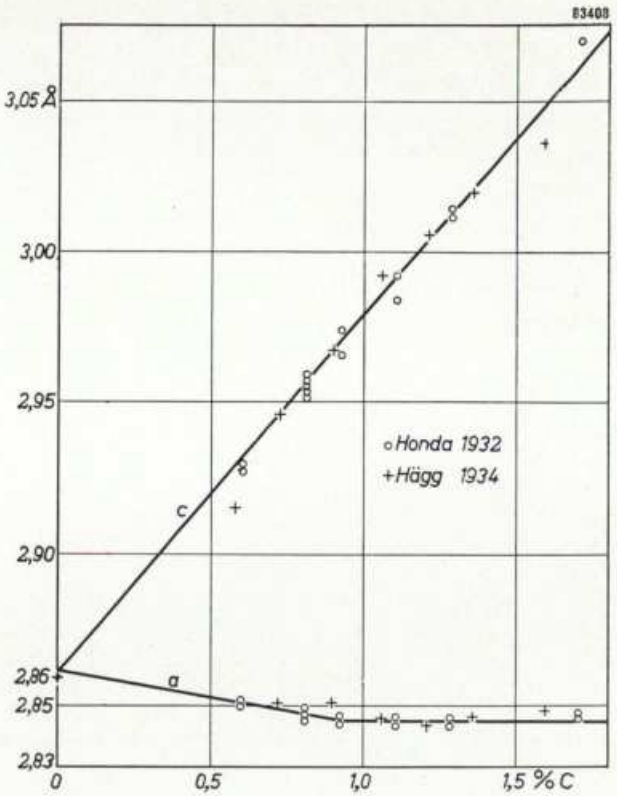


Fig. 10. Roosterconstanten (a en c) van martensiet als functie van het C-gehalte.

Ongeordende oplossingen

De precipitatie van carbide of nitride, die in ongeordende oververzadigde oplossingen van koolstof of stikstof in α-ijzer kan optreden, leidt eveneens tot een vergroting van de hardheid, die echter ver ten achter blijft bij de besproken technische harding, o.a. omdat de concentratie aan koolstof of stikstof in deze oplossingen veel geringer is. De precipitatie is bijzonder ongewenst als het metaal magnetisch zacht moet zijn. Wegens de reeds vermelde sterke daling van de oplosbaarheid bij dalende temperatuur kan zij reeds optreden in staal met een zeer gering C- en N-gehalte. Bij het streven naar de evenwichtstoestand ontstaat in de oververzadigde oplossing eerst een zeer fijn precipitaat, dat geleidelijk grover wordt, aangezien hierbij de totale grensvlakenergie daalt. Het precipitaat bemoeilijkt de beweging der Bloch-wanden en bereikt daarin een maximaal effect als de precipitaatdeeltjes van de orde van grootte van de dikte van een Bloch-wand (ca. 10^{-5} cm) zijn. De ongunstige invloed op de magnetische eigenschappen is dan aanzienlijk groter dan wanneer dezelfde hoeveelheid C of N zich in oplossing bevindt. Men duidt dit geleidelijk achteruitgaan van de magnetische eigenschappen met de naam magnetische veroudering aan. Dat ook langzaam afgekoeld vloeistaal dit verschijnsel vertoont, is gebleken op de gezamenlijke aanwezigheid van mangaan en

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

stikstof in dit metaal te berusten [7]). De aanwezige koolstof precipiteert bij de langzame afkoeling volledig, maar het mangaan vertraagt de precipitatie van stikstof in hoge mate. De coërcitiefkracht van vloeistaal met slechts 0,005 % N stijgt door enkele honderden uren verouderen op 100 °C vaak tot de dubbele waarde. Ook de hysteresisverliezen zijn dan natuurlijk veel groter geworden. Door een tijdelijke verwarming op slechts 250 °C kan men de geringe hoeveelheid stikstof weer in oplossing brengen en de oorspronkelijke coërcitiefkracht herstellen. Het verouderen begint dan echter bij lagere temperaturen weer van voren af aan.

Door metalen met een zeer grote affiniteit tot stikstof aan het staal toe te voegen, kan men de schadelijke werking grotendeels opheffen. Zulke metalen zijn bijv. aluminium, titaan, zirconium en vanadium. Zij vormen de stabiele nitriden AlN, TiN ZrN en VN. De geringe magnetische veroudering van siliciumijzer, dat in grote hoeveelheden gebruikt wordt voor de constructie van transformatoren, motoren en generatoren, schijnt op hetzelfde effect te berusten. Volgens onze onderzoekingen wordt nl. door een gepaste gloeibehandeling ook de in dit metaal aanwezige stikstof als een stabiel nitride, te weten siliciumnitride, vastgelegd.

De besproken veroudering, die op relatief snel koelen berust, wordt, ter onderscheiding van de eerder besproken vervormingsveroudering, afschrikveroudering genoemd. Zij komt eveneens in de mechanische eigenschappen tot uiting, omdat ook de bewegingen der dislocaties door een precipitaat bemoeilijkt worden. Het maximale hardende effect treedt in dit geval bij een veel geringere deeltjesgrootte op, aangezien de werkingssfeer van een dislocatie veel kleiner is dan de dikte van een Bloch-wand. Dit verschil wordt gedemonstreerd door *fig. 11*, die een schematische voorstelling geeft van het verloop van de hardheid en de coërcitiefkracht van vloeistaal met 0,07 % C na afschrikken van 680 °C en vervolgens verwarmen gedurende 1 uur op 50 °C, 100 °C, 150 °C, enz. De gegevens zijn ontleend aan metingen van W. Köster [8]). Zoals men ziet, treedt de maximale mechanische hardheid reeds op na verwarming op 100 °C. Na verwarming op hogere temperaturen is het precipitaat te grof om een groot effect op de mechanische eigenschappen te hebben. Daarentegen treedt de maximale beïnvloeding van de magnetische hardheid (de coërcitiefkracht) pas op na verwarming op 250 °C, als de deeltjes zich reeds op de grens van microscopische zichtbaarheid bevinden en hun invloed op de mechanische hardheid te verwaarlozen is.

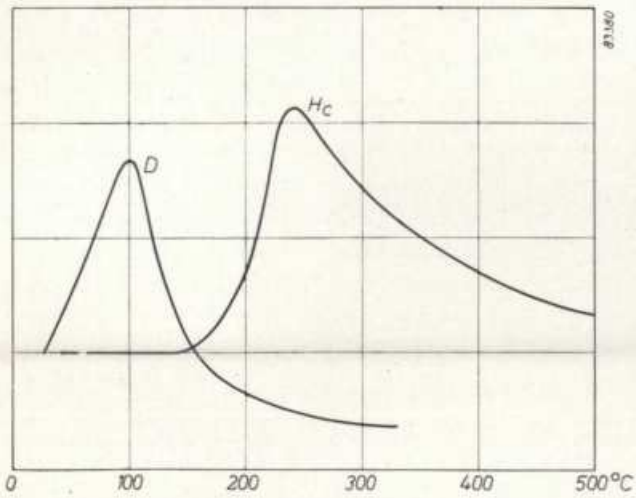


Fig. 11. Schematische voorstelling van de mechanische hardheid (D) en de coërcitiefkracht (H_c) van een soort vloeistaal met 0,07% koolstof na afschrikken vanaf 680 °C en verwarmen gedurende 1 uur op de als abscis aangegeven temperatuur (volgens Köster [8])).

[7]) J. D. Fast en L. J. Dijkstra, Philips techn. T. **13**, 172-180, 1951.

Transportverschijnselen in interstitiële oplossingen

Bij het beschouwen van de werkingen van interstitiële atomen in metalen werd in het voorgaande in hoofdzaak aandacht geschonken aan de invloed van de sterische factor. Dat men daarnaast de electronische wisselwerking, zelfs in het simpele geval van koolstof en stikstof in ongelegeerd ijzer, geenszins kan verwaarlozen, blijkt reeds uit experimenten over transportverschijnselen in electrische velden. Seith en medewerkers [9]) constateerden, dat koolstof zich in vast ijzer bij 1000 °C onder invloed van een electrisch veld in de richting van de negatieve pool beweegt, stikstof daarentegen in die van de positieve pool. Bijzonder duidelijk treden de transportverschijnselen op in zuurstofhoudend zirconium [10]). In een door gelijkstroom verhitte zuurstofhoudende zirconiumdraad beweegt de zuurstof zich naar de positieve pool. Aan de zijde van de negatieve pool ontstaat practisch zuiver zirconium. Dit is zelfs de enige tot nu toe gevonden methode om vast zirconium van zuurstof te bevrijden. Langs chemische weg is dit onmogelijk. Brengt men het zuurstofhoudende metaal bijv. in contact met vloeibaar calcium, dan wordt slechts een gedeelte van de zuurstof aan het metaal onttrokken, aangezien zijn affiniteit tot zuurstof bij afnemend zuurstofgehalte toeneemt. Het gelukt

[8]) W. Köster, Arch. Eisenhüttenwesen **2**, 503-522, 1928/29.
[9]) W. Seith, Diffusion in Metallen, Springer, Berlijn 1939.
[10]) J. H. de Boer en J. D. Fast, Rec. Trav. chim. Pays-Bas **59**, 161-167, 1940.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ook niet de zuurstof uit te drijven door het zuurstofhoudende zirconium in een goed vacuum op een hoge temperatuur te verhitten. Helaas heeft de methode van electrolytische zuivering geen technische betekenis, aangezien de beweeglijkheid en het transportgetal der zuurstofdeeltjes vele orden van grootte kleiner zijn dan die der geleidingselectronen. Opzettelijk wordt hier niet van ionen, maar van deeltjes gesproken, aangezien men niet aan duidelijk onderscheidbare O^{--}-ionen moet denken. Er schijnt slechts een zodanige verdeling van het electronengas in het metaal op te treden, dat de zuurstofatomen over een lange tijd beschouwd een gering overschot aan negatieve lading bezitten. De tot nu toe uitgevoerde experimenten wekken de indruk dat deze effectieve lading van de zuurstofatomen in zirconium ver beneden één elementaire lading ligt.

Zeer interessant zijn ook de verschijnselen die op de aanwezigheid van waterstof in metalen berusten. De hierboven besproken sterische factor schijnt bij oplossingen van waterstof in metalen nauwelijks een rol te spelen. Typerend is bijv. dat de oplosbaarheid van waterstof in de Zr-modificatie met de kleine interstities groter is dan in die met de grote interstities [11]). Het ligt voor de hand de verklaring hiervan in de uitzonderlijke kleinheid van het waterstofion te zoeken; de straal van dit ion (proton) is immers slechts ongeveer een honderdduizendste van die van een atoom. Weliswaar moet men zich ook hier niet voorstellen dat waterstof in de vorm van duidelijk onderscheidbare ionen in een metaal aanwezig is; over een lange tijd beschouwd zal een opgelost waterstofatoom echter gemiddeld een tekort aan negatieve lading hebben. In overeenstemming hiermee hebben transportproeven van Coehn en medewerkers [12]) geleerd dat waterstof zich in palladium naar de negatieve pool beweegt. Indien de opgeloste waterstof bij zijn bewegingen door het metaalrooster als proton springt, zal men voor dit element veel grotere diffusiecoëfficienten verwachten dan voor koolstof, stikstof en zuurstof. Deze verwachting wordt door de feiten bevestigd. Zo blijkt de diffusiecoëfficient van waterstof in α-ijzer bij 20 °C meer dan 10^{12} maal zo groot te zijn als die van koolstof en stikstof [13]). De diffusiecoëfficient in kwestie is zelfs zo groot dat men op grond van zijn waarde een reeds bij kamertemperatuur optredende doorlating van waterstof door ijzeren wanden zou verwachten. Schijnbaar in strijd hiermee blijkt het echter mogelijk dit gas onder hoge druk in ijzeren cylinders te bewaren zonder dat een merkbare drukvermindering optreedt als gevolg van diffusie door de wanden der cylinders. Een overeenkomstige schijnbare tegenstrijdigheid ligt in het reeds genoemde feit dat zuurstof door verhitting niet uit zirconiummetaal kan worden verdreven, zelfs niet bij temperaturen waarbij haar diffusiecoëfficient in dit metaal reeds een grote waarde blijkt te hebben.

De verklaring van deze schijnbare tegenstrijdigheden ligt in het feit dat de snelheid van permeatie van een gas door een metalen wand veelal niet door de diffusie, maar door een oppervlaktereactie bepaald wordt. Daar ons reeds herhaaldelijk gebleken is dat deze verklaring niet algemeen bekend geworden is (de publicatie ervan vond op een ongunstig tijdstip plaats [14])), moge hieraan nog een korte beschouwing worden gewijd.

Doorlating van gassen door metalen wanden

De permeatie van een tweeatomig gas door een metalen wand vereist vijf achtereenvolgende processen: 1) de splitsing van moleculen in atomen op het intree-oppervlak, 2) de overgang van de atomen vanuit de geadsorbeerde toestand naar het inwendige van het metaal, 3) de diffusie binnenin het metaal, 4) de overgang van de atomen van de opgeloste in de aan het uittree-oppervlak geadsorbeerde toestand, 5) de recombinatie der geadsorbeerde atomen tot moleculen op het uittree-oppervlak (*fig. 12*). Het langzaamste van de genoemde vijf processen zal de snelheid van het totale proces van doorlating bepalen. Bij de permeatie van waterstof door een ijzeren wand is het eerste der vijf processen, de splitsing van H_2 in 2H, het langzaamste en dus snelheidsbepalende proces. Dit wordt onmiddellijk gedemonstreerd door een experiment, waarbij de waterstof in atomaire vorm aan één zijde van een ijzeren wand wordt toegevoerd. Reeds bij kamertemperatuur treedt dan een vlotte doordringing op. Wordt het intree-oppervlak van het ijzer zeer ruw gemaakt, dan wordt het tweede proces, het naar binnen dringen van de geadsorbeerde waterstofatomen, het langzaamste proces. In dit geval treedt de splitsing van waterstofmoleculen in atomen aan scherpe hoeken en kanten reeds bij kamertemperatuur spontaan op. De binding van de gevormde atomen aan het oppervlak is nu

[11]) J. H. de Boer en J. D. Fast, Rec. Trav. chim. Pays-Bas **55**, 350-356, 1936.
[12]) A. Coehn en W. Specht, Z. Physik **62**, 1-31, 1930; A. Coehn en H. Jürgens, Z. Physik **71**, 179-204, 1931; A. Coehn en K. Sperling, Z. Physik **83**, 291-312, 1933.
[13]) J. D. Fast en M. B. Verrijp, J. Iron Steel Inst. **176** (I), 24-27, 1954.
[14]) J. D. Fast, Philips techn. T. **6**, 369-376, 1941; **7**, 74-82, 1942.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

echter zoveel sterker dan die aan een glad oppervlak, dat de overgang naar het inwendige van het metaal snelheidsbepalend is. Uit experimenten met andere combinaties gas-metaal blijkt, dat ook de gevallen te realiseren zijn waarin het derde, vierde of vijfde proces snelheidsbepalend is. Zo is bijv. de diffusie snelheidsbepalend bij de permeatie van waterstof door een koperen wand. Boven enkele honderden graden Celsius bepaalt zij, in tegenstelling met hetgeen bij kamertemperatuur het geval is, ook de snelheid van permeatie van waterstof door een ijzeren wand. De processen aan het uittree-oppervlak bepalen de permeabiliteit van een wand van zirconium voor zuurstof en die van een wand van palladium voor waterstof.

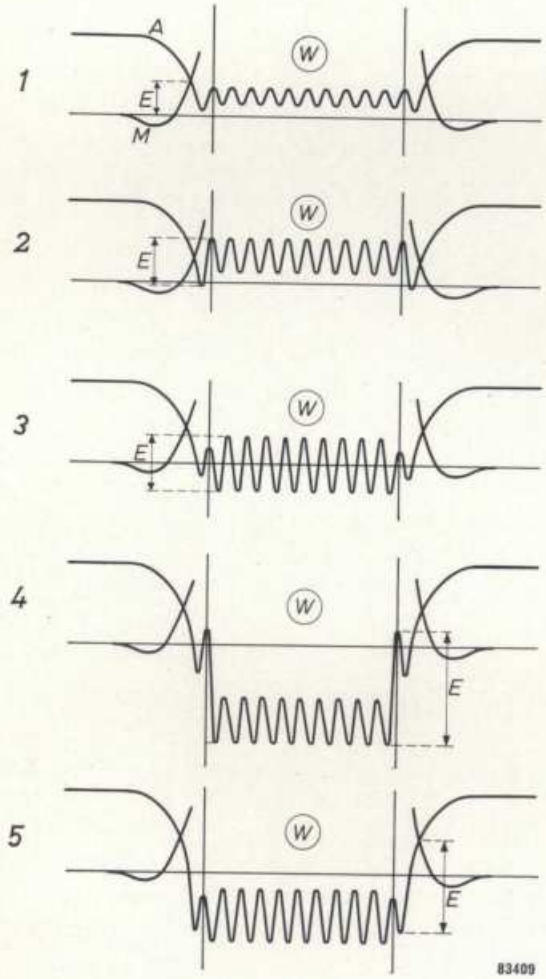


Fig. 12. Schematische voorstelling van de permeatie van een gas door een metalen wand (*W*). De „potentiaalkrommen" *M* en *A* geven de energie van een gasmolecuul resp. van de twee afzonderlijke atomen waaruit het bestaat, als functie van de plaats. De grootste optredende potentiaalsprong (*E*) bepaalt de snelheid van de permeatie. Deze grootste sprong kan, naar gelang van de eigenschappen van het gas en het metaal, op vijf verschillende plaatsen voorkomen, waaraan de in de tekst opgesomde gevallen *1-5* beantwoorden.

Om dit, noodzakelijkerwijze onvolledig, overzicht van de invloed van interstitiële atomen in metalen te besluiten, willen wij nog even terugkomen op de gevallen waarin hun aanwezigheid tot een grote hardheid en brosheid van het metaal leidt. Zoals uit het bovenstaande moge zijn gebleken, berust de grote hardheid van martensiet op de vorming van een nieuw rooster met sterk verkleinde interstities, waarin de koolstof- resp. stikstofatomen geforceerd aanwezig zijn. Men zou zich ook een harding kunnen voorstellen die niet op de vorming van nieuwe interstities, maar op die van nieuwe atomen berust. Dit geval doet zich inderdaad voor in kernreactoren met uranium als brandstof en vormt daar één van de dringendste metaalproblemen. Het elementaire proces waarop de energielevering in een dergelijke reactor berust, is de splitsing van een kern van het isotoop U^{235}. Hierbij ontstaan twee nieuwe atomen, waarvan er in het gunstigste geval slechts één op een roosterplaats kan worden ondergebracht, terwijl het andere interstitieel moet worden opgenomen. De steeds stijgende concentratie aan interstitiële atomen doet de uraniumstaven ten slotte uiteenvallen. Het behoort tot de taken van de metaalkundige het uraniummetaal in een zodanige toestand te brengen dat het zoveel mogelijk extra atomen kan opnemen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

STIFTLASSEN MET LASPATRONEN

door W. P. van den BLINK *), E. H. ETTEMA *) en P. C. van der WILLIGEN.

621.791.75

Per dag worden, globaal geschat, ruim een millioen stiften gelast, een aantal dat in de komende jaren nog aanzienlijk zal toenemen. Dit demonstreert duidelijk het belang van een goedkoop en doeltreffend stiftlasprocédé zoals dit door de auteurs is ontwikkeld.

Inleiding

Onder stiftlassen verstaat men het vastlassen van een staafvormig voorwerp (stift, draadeinde, bout) loodrecht tegen een werkstuk, bijv. een plaat, zonder dat gebruik wordt gemaakt van een afzonderlijke laselectrode. Men kan dit doen met een weerstandslas, maar ook door de te lassen stift zelf als laselectrode te gebruiken, dus door tussen stift en plaat een boog te trekken.

Stalen stiften, bevestigd loodrecht op een stalen wand, komen in de practijk veelvuldig voor. Enige voorbeelden zijn: draadeinden voor het vastzetten van deksels, voor het verbinden van machinedelen, voor flensverbindingen voor het bevestigen van bekledingen op stalen wanden (bijv. van een houten bekleding op stalen scheepsdekken), en voor het bevestigen van beugels waarmee pijpleidingen in schepen of in andere stalen constructies worden vastgezet. Een voorbeeld uit de ketelbouw is het aanbrengen van grote aantallen stiften op vlampijpen, om het voor warmte-overdracht beschikbare oppervlak te vergroten. De titelfoto toont het aanbrengen van stiften in een stalen tank bij de N.V. Werkspoor te Amsterdam, volgens een in dit artikel te bespreken, nieuw ontwikkeld stiftlasprocédé.

Het stiftlassen levert een grote tijdsbesparing vergeleken met de klassieke methode, waarbij een stift met schroefdraad wordt vastgezet in een van te voren geboord en getapt gat. Zo'n gat betekent bovendien een verzwakking van de plaat en een mogelijkheid van lekken — dezelfde bezwaren die ook bij klinken gelden. Het is daarom begrijpelijk dat de klassieke methode meer en meer wordt verdrongen door verschillende stiftlasprocédés.

*) Philips' Lasstavenfabriek, Utrecht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Weerstandslassen

Bij de weerstandslasmethode stuurt men een sterke stroom door stift en werkstuk, die in contact met elkaar zijn opgesteld. Door de overgangsweerstand wordt het materiaal op de contactplaats sterk verhit; is het voldoende plastisch geworden, dan drukt men stift en werkstuk, die daartoe tussen de bekken van een pers zijn opgesteld, krachtig tegen elkaar. Afhankelijk van stroomsterkte en persdruk wordt de stift over een kleiner of groter deel van haar doorsnede vastgelast. De opstelling in een pers legt zekere beperkingen op aan vorm en afmetingen van het werkstuk. Een voordeel in vergelijking met andere lasmethodes is, dat geen kransje lasmateriaal rond de stiftvoet optreedt (*fig. 1*), wat in bepaalde gevallen (bijv. bij flensverbindingen) van belang kan zijn.

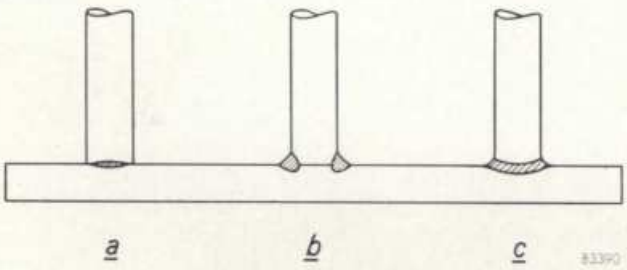


Fig. 1. Schematisch beeld van de lasvormen die optreden bij de verschillende methodes van stiftlassen.
a) Las gemaakt met behulp van de weerstandslasmethode.
b) Las gemaakt met een afzonderlijke booglaselectrode.
c) Las gemaakt volgens een methode waarbij de boog direct tussen stift en plaat wordt getrokken.

De gebruikelijke stiftlasmethode

Natuurlijk kan men stiften met een normale laselectrode vastlassen. Dit levert in het algemeen een betere verbinding en is ook minder aan beperkingen gebonden dan het weerstandslassen (bijv. wat betreft de afmetingen van het werkstuk), maar het is vrij kostbaar, daar het veel tijd en vakmanschap vereist. Voor het lassen van grote hoeveelheden stiften, bijv. in de scheeps- en de ketelbouw, is dan ook gedurende de tweede wereldoorlog het stiftlassen met een vlamboog rechtstreeks tussen stift en werkstuk naar voren gekomen. Gewoonlijk wordt hierbij door een in de houder (het zg. „pistool") ondergebracht mechanisme eerst de stift in aanraking gebracht met het werkstuk; de lasstroom wordt vervolgens ingeschakeld en direct hierna wordt de stift enkele millimeters van het werkstuk gelicht, waardoor een boog ontstaat. Na een vooraf bepaalde tijd, waarin zich aan het stifteinde en op het werkstukoppervlak voldoende vloeibaar staal heeft gevormd, schakelt een afzonderlijk apparaat, verbonden met het pistool, de stroom uit en ontgrendelt in het pistool een veer die nu de stift in de laspoel drukt.

Bij een stift van $^1/_2$ duim dikte is de lastijd van de orde van $^1/_2$ sec en de vereiste stroom 500-1000 A. Ten einde wegvloeien of spatten van het vloeibare metaal tegen te gaan, wordt vaak — bij verticaal en boven het hoofd lassen steeds — een porseleinen ring om de lasplaats aangebracht. Deze ring wordt na het lassen stukgeslagen en verwijderd.

Hoewel de methode in de practijk voldoet, heeft zij toch enige belangrijke bezwaren, die voor een groot deel kunnen worden teruggevoerd op het feit dat de stift, die thans tevens als laselectrode dienst doet, een onbeklede electrode is. Zo wordt bij deze methode vrijwel uitsluitend gelijkstroom gebruikt, en de vereiste gelijkrichter is door de grote toegepaste stroomsterkten tamelijk kostbaar. Met wisselstroom van de gebruikelijke spanning (ca. 80 V) kan men immers geen onbeklede electrodes lassen, daar hierbij de boog niet stabiel is en voortijdig zou doven. Een ander gevolg van het ontbreken van een slakvormende bekleding is dat, tenzij bijzondere maatregelen worden genomen, een las van inferieure kwaliteit wordt verkregen. De maatregelen die men neemt, bestaan uit het gebruik van een speciale staalsoort voor de stift, al of niet in combinatie met aan het stifteinde aangebrachte desoxydatiemiddelen. Dit betekent dat men, althans voor vele toepassingen, gebruik moet maken van speciaal voor het doel vervaardigde stiften. Ten slotte is de apparatuur die de stift de nodige bewegingen doet uitvoeren en tevens het schakelen volbrengt, vrij gecompliceerd.

Het scheen dus de moeite waard te zoeken naar een eenvoudiger stiftlasprocédé. Hieronder zullen wij eerst de grondslagen en de uitvoering beschrijven van een nieuwe methode, die het resultaat is van dit onderzoek. De bezwaren klevende aan het zojuist besproken stiftlasprocédé zijn hierbij overwonnen. Vervolgens bespreken wij enige metingen, verricht ter analysering van het nieuwe procédé, en een aantal beproevingen van gemaakte lassen. Enige voor de laspractijk belangrijke bijzonderheden besluiten het artikel.

Grondslagen van de nieuwe methode

Omtrent 1945 is in het Philips-laboratorium te Eindhoven het Contact-booglassen ontwikkeld [1]). Daarbij worden laselectrodes gebruikt waarvan de bekleding zeer dik en bovendien halfgeleidend is gemaakt door het lasmetaal voor een aanzienlijk

[1]) P. C. van der Willigen, Philips techn. T. **8**, 161-167 en 304-309, 1946; Sheet Metal Ind. **26**, 155, 1949; Schweissen und Schneiden **2**, 270, 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gedeelte als poeder in de bekleding onder te brengen. Laselectrodes van dit soort hebben de eigenschap dat zij gemakkelijk ontsteken en herontsteken, en bovendien kan men er slepend mee lassen. De nieuwe stiftlasmethode is ontwikkeld, uitgaande van de bij het Contact-lassen toegepaste principes [2]).

Stel dat men een Contact-laselectrode waarmee reeds gelast is, waardoor zich aan de punt van de electrode een diepe „kelk" heeft gevormd (*fig. 2*), op een werkstuk plaatst. Schakelt men vervolgens de spanning in, dan zal eerst een snel aangroeiende stroom via de kelk naar het werkstuk lopen. Dit snel aangroeien is het gevolg van doorslageffecten tussen de ijzerpoederkorrels in het materiaal van de kelk, waardoor de korrels samensmelten en de weerstand snel afneemt. Na korte tijd is de temperatuur ter plaatse genoeg gestegen om de boog te

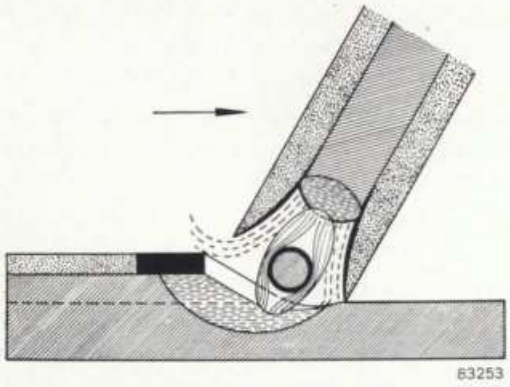


Fig. 2. Bij een Contact-laselectrode vormt zich gedurende het afsmelten aan het uiteinde een diepe „kelk", die „vastvriezen" der electrode voorkomt.

doen ontsteken. Tijdens het afsmelten van de electrode blijft de kelk bestaan; deze houdt voortdurend de kerndraad op een zekere afstand van het werkstuk, zodat „vastvriezen" van de laselectrode op het werkstuk wordt voorkomen.

Verwijdert men echter de bekleding van een Contact-laselectrode, met uitzondering van een stukje aan de punt, en drukt men deze afgepelde electrode loodrecht op het werkstuk, dan brandt na inschakelen van de stroom de boog aanvankelijk normaal; is de bekleding bijna op, dan zakt de kerndraad plotseling door de kelk heen (*fig. 3*) en vriest hij vast in de laspoel — waarom het bij stiftlassen juist begonnen is. De brandtijd van de electrode wordt, behalve door de stroomsterkte, bepaald door de afmetingen en de samenstelling van de bekleding.

[2]) Het idee om een eenvoudig stiftlasprocédé te baseren op de principes van de Contact-lasmethode, is afkomstig van Dr H. Bienfait van het Philips-laboratorium te Eindhoven.

De grondgedachte van de nieuwe stiftlasmethode is geweest, de bekleding afzonderlijk te vervaardigen in korte stukken, waarin de kelkvorm reeds is aangebracht, en van een samenstelling analoog aan die van de bekleding der Contact-electrodes. Zo'n los stuk bekleding (de „laspatroon"), aangebracht

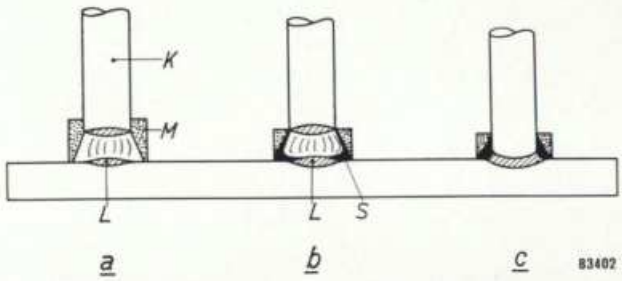


Fig. 3. Schematische voorstelling van de stadia bij het maken van een stiftlas met een van een kelk voorziene, afgepelde Contact-laselectrode. *M* is het niet-weggenomen gedeelte van de bekleding, *K* de kerndraad, *L* de lasspoel, *S* de slak.
a) Direct na het ontsteken van de boog.
b) Direct vóór het doorschieten van de electrode. De bekleding is gedeeltelijk weggesmolten, evenals de kerndraad. Er hebben zich een laspoel en een hoeveelheid slak gevormd.
c) Na het doorschieten van de electrode. Het lasmetaal is omgeven door de slak, terwijl de kelkresten de las omgeven en daardoor meewerken aan de vormgeving van de las.

op het uiteinde van een stift, zou het mogelijk maken de stift vast te lassen op de wijze boven beschreven voor de afgepelde Contact-electrode. Deze gedachte heeft, na veel experimenteren, geleid tot de nu te beschrijven eenvoudige uitvoeringsvorm.

De nieuwe stiftlasmethode

De vorm van de laspatroon

In *fig. 4* ziet men de laspatroon bevestigd op een stift *A* en het geheel geplaatst op het werkstuk waaraan de stift moet worden vastgelast. De laspatroon bestaat uit twee delen, het startlichaam *B*, vervaardigd van halfgeleidend materiaal, en de kartonnen huls *C*, die klemmend om het startlichaam

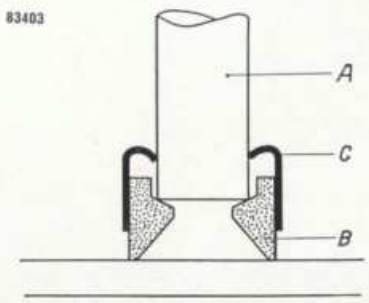


Fig. 4. De laspatroon, bestaande uit een halfgeleidend startlichaam *B* en een kartonnen huls *C*, waarmee *B* geklemd wordt op de te lassen stift *A*. Tijdens het lassen smelt het gedeelte van het startlichaam waar de stift op steunt, weg, waardoor de stift in de laspoel gedrukt kan worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

is bevestigd. Het startlichaam vertoont de aan de Contact-electrode ontleende kelkvorm, de te lassen stift rust op een in het startlichaam aanwezige vernauwing. *Fig. 5* is een foto van enige stiften ($^1/_2$″) en bijbehorende laspatronen.

Het lasproces verloopt in grote trekken op de wijze die voor de afgepelde Contact-electrode is beschreven. De door de boog ontwikkelde hitte doet het startlichaam *van binnen uit* smelten; op het ogenblik dat de steunrand voor de stift is verdwenen, zakt de stift (waarop enige druk wordt uitgeoefend) in de laspoel, de boog wordt kortgesloten en de stift vriest vast. Gedurende het proces van afsmelten blijft de buitenzijde van het startlichaam intact en de booglengte blijft dus ongeveer constant tot het ogenblik dat de stift door de kelk zakt.

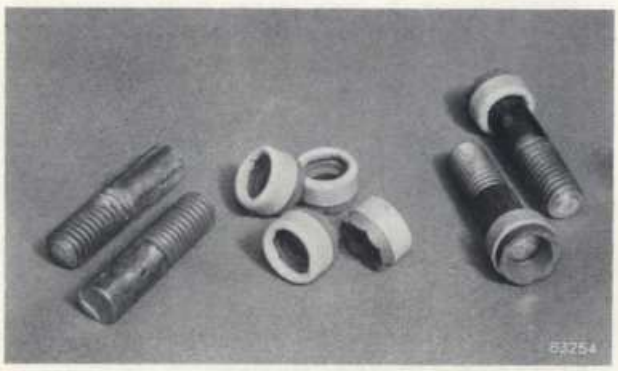


Fig. 5. Stiften met draadeinde ($^1/_2$″) en de bijbehorende laspatronen. Links een tweetal stiften met opgeschoven laspatronen.

De kartonnen huls vervult twee functies. Ten eerste voorkomt ze dat het vrij brosse halfgeleidende materiaal van het startlichaam tijdens het lassen voortijdig uiteenvalt; dit uiteenvallen zou een te korte lastijd tot gevolg hebben. Ten tweede dient ze ter bevestiging van de laspatroon aan de stift. Daartoe is de huls aan de bovenzijde voorzien van een naar binnen omgekrulde rand, die enigszins klemmend past om de te lassen stift. Deze bevestiging is voldoende stevig om te voorkomen dat de laspatroon afvalt bij het hanteren van de stift.

Het gebruik van karton als materiaal voor de huls is mogelijk doordat de gedurende het branden van de boog (ca. 0,5 sec) ontwikkelde hitte pas tot de buitenzijde van het startlichaam doordringt nadat de las tot stand is gebracht. Inderdaad vliegt de huls dan pas in brand — dus nadat ze haar taak heeft vervuld.

De samenstelling van de laspatroon

De eerste proeven zijn gedaan met startlichamen van een samenstelling die vergelijkbaar was met die van de bekleding van een Contact-laselectrode. Het bleek echter dat aan het startlichaam veel hogere eisen gesteld moeten worden wat betreft vrijheid van gas en ongevoeligheid voor vocht dan aan bekledingen van laselectrodes. Dit hangt samen met de korte duur van het proces: hierdoor ontbreekt naverwarming en stolt het lasmetaal zeer snel. Eventueel in het metaal ingesloten gassen krijgen nu in veel mindere mate dan bij het normale booglassen gelegenheid te ontwijken[3]).

De eis van vrij zijn van gas brengt mee dat de startlichamen in de fabricage op een hogere temperatuur moeten worden verhit (zg. „stoken") dan voor laselectrodes normaal is. Dit vereist stoken in neutraal of reducerend milieu, ten einde de aanwezige metaalpoeders tegen oxydatie te beschermen.

Bij het experimenteren met verschillende bekledingsbestanddelen bleek dat een laag smeltpunt vermeden dient te worden. Dit is ook begrijpelijk: immers de stift komt vrij op het moment dat de plaatselijke vernauwing in het startlichaam, waarop de stift steunt, is weggesmolten. Ligt het smeltpunt van het startlichaam ver beneden dat van het stiftmateriaal, dan is de ondersteuning reeds weggesmolten voordat het stiftuiteinde geheel vloeibaar is, en de stift wordt te vroeg in de laspoel gedrukt.

Met een massa die gedeeltelijk uit titaandioxyde (TiO_2) en voor de rest uit bindmiddelen, desoxyderende metalen, enz. bestaat, bleek het mogelijk een startlichaam te maken dat voldoet aan de eisen die het proces stelt. Het geleidingsvermogen, nodig voor het inleiden van de boog, wordt hierbij niet verkregen door de aanwezigheid van een zekere hoeveelheid ijzerpoeder — dit in tegenstelling tot wat het geval is bij Contact-electrodes. Daar in neutraal of reducerend milieu moet worden gestookt, konden wij namelijk gebruik maken van de bekende eigenschap van TiO_2 dat dit in een reducerende atmosfeer en bij hoge temperatuur een gedeelte van zijn zuurstof verliest en dan electrisch in zekere mate geleidend wordt (halfgeleidend). Hierbij kan men het geleidingsvermogen van het TiO_2, binnen bepaalde grenzen, nauwkeurig regelen, daar dit geleidingsvermogen afhangt van de reductiegraad, die men in de hand heeft door de omstandigheden waaronder gestookt wordt. De waarde van het geleidingsvermogen luistert zeer nauw: is het te gering, dan wordt de boog niet ontstoken; is het te groot, dan gaat door het startlichaam een groot gedeelte van de lasstroom, waardoor het te vroeg kan smelten.

---

[3]) Zie bijv. J. D. Fast, Oorzaak van porositeit in lasnaden, Philips techn. T. **11**, 101-110, 1949.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het laspistool

In principe kan met de bovenbeschreven laspatronen gelast worden door de te lassen stift te klemmen in een lastang (veel gelijkend op het type dat bij het normale lassen wordt gebruikt) en dan op het werkstuk te drukken, waarbij de stroomtoevoer via deze tang geschiedt. In de practijk stuit deze methode echter op ernstige bezwaren:

1) Men kan met de hand de stiften niet voldoende haaks op het werkstuk plaatsen.
2) Het is onmogelijk bij het lassen van een aantal stiften van gelijke lengte de bovenkanten nauwkeurig op hetzelfde niveau te krijgen, doordat de stiften niet alle even ver in de laspoel worden gedrukt.
3) Rechtstreeks in- en uitschakelen van de stroom door middel van de lastang, zoals bij het handlassen gebeurt, is niet doenlijk.

Dit alles maakte het gewenst een speciale houder te construeren, een laspistool, dat in principe is geschetst in *fig. 6*; in het onderschrift bij deze figuur is de werking verklaard.

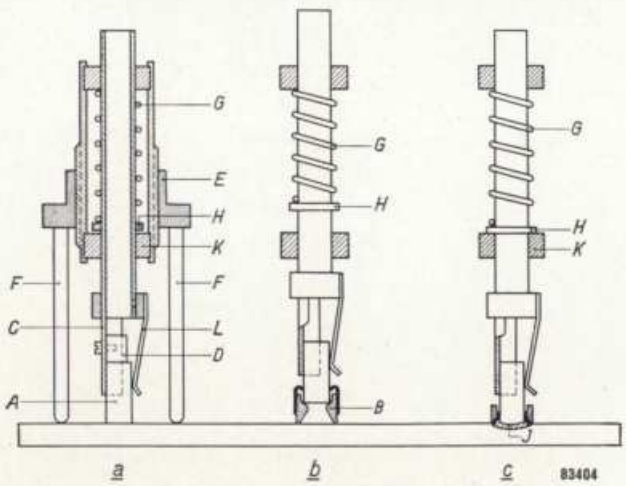


Fig. 6. Schema van de werking van een laspistool.
a) De stift *A* wordt door de bladveer *L* geklemd in de stifthouder *C* en rust tegen de aanslag *D*, die verstelbaar is om stiften van verschillende lengte te kunnen lassen (grove regeling). Met de schroefring *E* (fijne regeling) brengt men het ondervlak van de stift ongeveer 0,5 mm buiten het vlak door de uiteinden van de steunpoten *F*. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van een eenvoudig malletje, bestaande uit een vlak plaatje van ongeveer 0,5 mm dikte met een gat dat iets groter is dan de diameter van de stift: het plaatje wordt zodanig tegen de steunpoten geplaatst dat het stiftuiteinde juist in het gat valt. Door de veer *G* wordt de stift onder druk tegen het werkstuk gebracht.
b) De laspatroon *B* is op de stift gemonteerd. Bij het plaatsen van het pistool op het werkstuk verplaatst de nok *H* zich meer naar boven en de veer *G* wordt sterker gespannen. In deze stand wordt de stroom ingeschakeld. De boog ontsteekt nu en na het wegsmelten van het gedeelte van de laspatroon waarop de stift steunt, wordt de stift door de veer *G* op het werkstuk gedrukt.
c) Nadat de las tot stand is gekomen, rust de nok *H* op de aanslag *K*. Hierdoor wordt de stift bij het lassen altijd even ver in de laspoel gedrukt. De „overmaat" lasmateriaal bij *J* wordt bepaald door de afstand van ongeveer 0,5 mm die de stift oorspronkelijk uitstak.

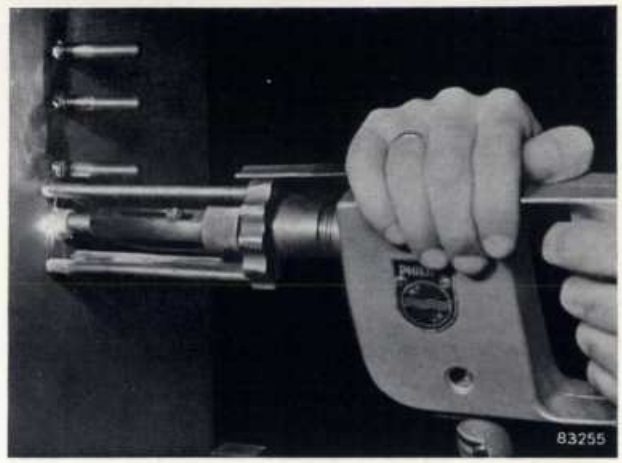


Fig. 7. Het lassen tegen een verticale wand van een $^3/_8{}''$-stift volgens de nieuw ontwikkelde methode met laspatronen.

Het stiftlassen geschiedt nu op de volgende wijze. Men plaatst de te lassen stift in het pistool, dat men vervolgens op de lengte van deze stift instelt. De hiervoor vereiste handelingen zijn uiteraard slechts éénmaal nodig als een groot aantal stiften van gelijke lengte (tolerantie bijv. $\pm$ 0,2 mm) wordt gelast. Daarna schuift men een laspatroon op de stift, zet het pistool op de juiste plaats op het werkstuk en drukt aan. Vervolgens schakelt men de stroom in met een in het pistoolhandvat ingebouwde

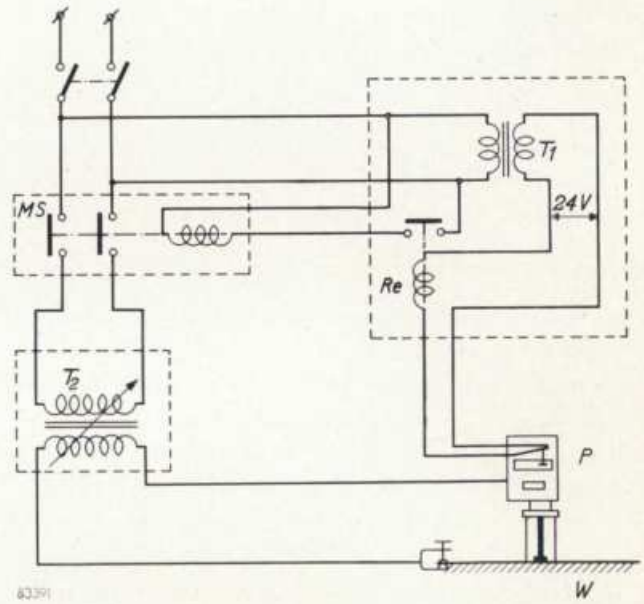


Fig. 8. Principeschema van de electrische schakeling bij het stiftlasprocédé met laspatronen. Bij dit procédé kan met wisselstroom worden gewerkt, dwz. er kunnen normale lastransformatoren worden gebruikt (ca. 75 V open spanning). De in het handvat van het pistool *P* opgenomen microschakelaar bedient de spoel van het relais *Re*. De bekrachtigingsspanning hiervan is slechts 24 V (transformator T_1), zodat aanraking van de microschakelaar, ook bij eventuele defecten, ongevaarlijk is. Het relais bedient de magnetische schakelaar *MS*, die op zijn beurt de lastransformator T_2 in- en uitschakelt. *W* is het werkstuk waarop de stift wordt vastgelast.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

schakelaar. Is de boog verdwenen (de boog brandt ca. 0,5 sec) en de las tot stand gekomen, dan laat men de schakelaar los, waardoor de kortsluitstroom wordt uitgeschakeld. Nadat het pistool van het werkstuk is genomen, verwijdert men de resten van de laspatroon. De tijd die verloopt tussen inschakelen en uitschakelen, bedraagt ca. 2 sec. In *fig. 7* ziet men het pistool met ingezette stift en laspatroon bij het lassen van een stift tegen een verticale wand. Het principeschema van de electrische schakeling is in *fig. 8* gegeven.

Vergelijking met de gebruikelijke stiftlasmethode

Vergelijkt men het nieuwe stiftlasprocédé met de tot dusverre gebruikelijke stiftlasmethode, dan blijken de bezwaren die aan de laatste kleven, te zijn opgeheven. In de eerste plaats heeft men thans de voordelen verkregen die het lassen met beklede electrode biedt boven het lassen met onbeklede electrode. Zoals bekend, vervult de bekleding o.a. een metallurgische taak (waaronder wij niet alleen de reactie van de slak met het vloeibare metaal en de verontreinigingen daarin, maar ook het aanbrengen van legerende bestanddelen in de las rekenen), waardoor het mogelijk wordt voor de stiften staal van normale handelskwaliteit te gebruiken. De stiften behoeven dus niet meer van speciale staalsoorten vervaardigd te worden. Een andere belangrijke taak van de bekleding is de stikstofopneming uit de lucht te verminderen. Onderzoekt men de lasplaats met een vijl, dan blijkt inderdaad dat de hardheid, als gevolg van nitridevorming in het lasmetaal, bij het nieuwe proces veel geringer is dan bij het gebruikelijke. De bekleding oefent bovendien een stabiliserende werking uit op de boog, doordat zij stoffen bevat die bij hoge temperatuur gemakkelijk electronen emitteren. Deze stabilisatie van de boog veroorlooft de toepassing van wisselstroom van lage frequentie (bijv. netfrequentie) en betrekkelijk lage spanning. Op de voordelen van wisselstroomlassen (goedkope lasapparaten, minder magnetische blaaswerking) behoeft hier niet nader te worden ingegaan.

In de tweede plaats zorgt de laspatroon zelf voor het ontsteken van de boog en voor het constanthouden van de booglengte gedurende het branden; bovendien geeft zij automatisch de weg tussen stift en werkstuk vrij nadat de boog de vereiste tijd heeft gebrand. Hiervoor behoeven dus in het pistool en de daarbij behorende apparatuur geen voorzieningen te worden getroffen, waardoor deze onderdelen betrekkelijk eenvoudig en goedkoop worden. In fig. 8 ziet men dan ook dat het pistool, behalve de simpele mechanische constructie voor het inklemmen en het aandrukken van de stift, slechts een schakelaar bevat, terwijl, behalve de lastransformator T_2, slechts het relais *Re* met de transformator T_1 (die samen in één kastje zijn ondergebracht) en de magnetische schakelaar *MS* nodig zijn.

Metingen aan het proces

Wij hebben de verschillende stadia van het lasproces bestudeerd door de spanning, de stroom en de afstand tussen stift en werkstuk als functie van de tijd op te nemen met behulp van een registreertoestel. *Fig. 9* is een reproductie van een door dit toestel geregistreerd diagram, dat betrekking heeft op het lassen van een $^1/_2$''-stift op een plaat. Er zijn drie stadia te onderscheiden, die vooral duidelijk uitkomen in het spanningsdiagram.

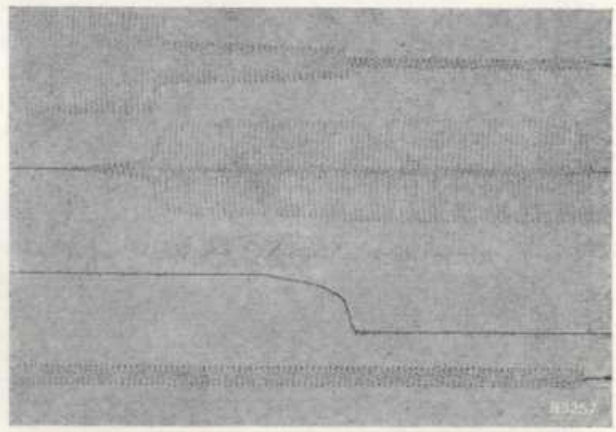


Fig. 9. Diagram, opgetekend tijdens het lassen van een $^1/_2$''-stift. Van boven naar onder ziet men, opgetekend als functie van de tijd: de spanning, de stroom, de verplaatsing van de stift, en een constante wisselspanning met frequentie van 50 Hz, die dienst doet als tijdschaal.

In het eerste stadium is de spanning vrijwel gelijk aan de open spanning van de lastransformator (ca. 80 V). De stroomsterkte groeit geleidelijk aan (startstroom door het geleidende startlichaam). Als de boog ontsteekt, begint het tweede stadium, tijdens hetwelk de boog brandt. De spanning daalt hierbij tot de boogspanning (ca. 40 V), terwijl de stroomsterkte toeneemt tot ca. 700 A. Ongeveer 0,4 sec (20 periodes) na het ontsteken van de boog begint het startlichaam aan de binnenzijde te verweken, hetgeen zichtbaar is aan een geleidelijke verplaatsing van de stift (zie de derde lijn in het diagram). Als de steunrand voor de stift geheel is weggesmolten, wordt de stift plotseling in de laspoel gedrukt; dit komt overeen met het steile deel van de verplaatsingslijn in het diagram.

De verbinding tussen stift en plaat is nu tot stand gekomen en de stroomsterkte stijgt nog enigszins, tot de kortsluitwaarde. De stroom kan nu worden uitgeschakeld en het laspistool weggenomen. Het ver-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dient aanbeveling, hiermee, na het verdwijnen van de boog, enige tienden seconden te wachten, om het metaal gelegenheid te geven te stollen.

Bij de studie van het lasproces kan men met vrucht van dergelijke diagrammen gebruik maken, doordat zij de invloed van allerlei variabelen zichtbaar maken. Bij wijze van voorbeeld is in *fig. 10* weergegeven het lassen van een $^1/_2$''-stift met vrij grove schroefdraad op het te lassen einde. Overigens waren de omstandigheden dezelfde als in fig. 9. Wat in fig. 10 opvalt, is dat de stift, blijkens de verplaatsingslijn, niet regelmatig zakt doch schoksgewijs. De oorzaak kan zijn dat de, op de steunrand in het startlichaam rustende schroefdraad al plaatselijk begint te smelten voordat deze steunrand is weggesmolten. De stift zakt hierdoor over een kleine afstand, wat kortsluiting veroorzaakt, zoals uit het spanningsdiagram blijkt. Na ongeveer 0,02 sec herstelt de boog zich, verdwijnt echter na ca. 0,1 sec nogmaals door kortsluiting, maar herstelt zich opnieuw; daarna zakt de stift weer over een korte afstand, waarbij opnieuw kortsluiting optreedt; hierna zakt de stift niet verder. De totale verplaatsing is kleiner dan in het voorgaande diagram en bij onderzoek bleek dan ook, dat de stift niet behoorlijk met de plaat was versmolten. Tijdens het

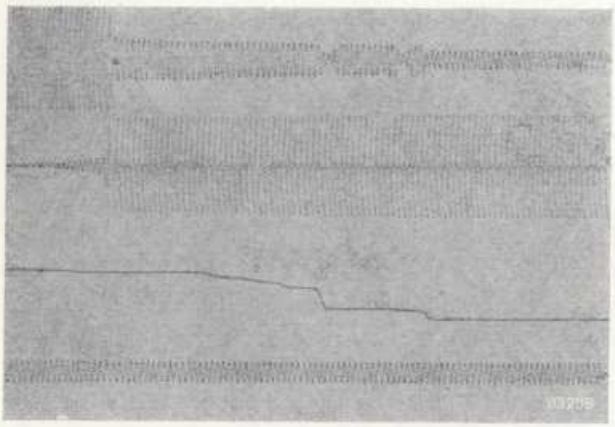


Fig. 10. Als fig. 9, maar nu voor een $^1/_2$''-stift die aan het te lassen uiteinde voorzien was van grove draad. De verplaatsing van de stift is onregelmatig. Het resultaat is een minder goede las. De oorzaak kan zijn het voortijdig smelten van de schroefdraad.

lassen is in een dergelijk geval ook aan het onregelmatige geruis van de boog te horen dat het lasproces niet naar behoren verloopt.

Aan de afwerking van het stifteinde worden, om een behoorlijk lasresultaat te krijgen, verder geen hoge eisen gesteld. Het eindvlak moet vlak zijn en zonder bramen, het moet loodrecht op de stift staan en de stift zelf mag geen sterke onrondheid vertonen. In *fig. 11* is de opstelling weergeven waarmee de besproken diagrammen zijn opgenomen.

Fig. 11. De opstelling voor het registreren van spanning en stroom en van de afstand tussen stift en werkstuk als functie van de tijd gedurende het lassen. Hierbij werd niet van het normale laspistool gebruik gemaakt. De plaats van de laspatroon wordt door de pijltjes aangewezen.

Eigenschappen van de verkregen lasverbinding

Het lasmetaal is grotendeels afkomstig van de stift en de plaat, en uiteraard bepalen de samenstellingen hiervan dus mede de samenstelling en de eigenschappen van het lasmetaal. Door toevoeging van desoxydantia in het startlichaam wordt er echter voor gezorgd dat het lasmetaal als „gekalmeerd" staal [4]) stolt (*fig. 12*).

Het proces is voornamelijk bedoeld voor het lassen van stiften op ongelegeerd staal (C-gehalte ca. 0,2%). Bij hardende staalsoorten zal het, afhankelijk van de eisen die men stelt aan de verbinding, aanbeveling kunnen verdienen de lasplaats voor te verwarmen, ten einde de afkoelsnelheid, en daarmee de harding, te beperken.

De eenvoudigste proef waaraan men de lasverbinding kan onderwerpen ter controle van de sterkte, is het ombuigen van de stift, bijv. door hamerslagen. Bij zacht staal vindt men dan dat de stift tot 90° kan worden omgebogen zonder dat breuk optreedt

[4]) Onder „gekalmeerd" staal verstaat men staal dat na het gieten onder geringe gasontwikkeling stolt. De gasontwikkeling bij het stollen van „ongekalmeerd" staal veroorzaakt segregaties en porositeit.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(*fig. 13*). Bij gebruik van brosser materiaal voor stift of plaat, bijv. automatenstaal, is de bereikbare plastische vervorming geringer.

Een andere eenvoudige proef is het stuktrekken van een gedeeltelijk van schroefdraad voorziene stift met behulp van een moersleutel. Men plaatst een kort stukje pijp om een op een plaat gelaste stift, waarna een moer op de stift en tegen de pijp wordt geschroefd. Wordt deze moer voldoende krachtig aangedraaid, dan bezwijkt ten slotte de stift. Zijn stift en plaat van zacht staal, dan breekt de stift nooit in de las, maar steeds in de

Fig. 12. Doorsnede over een $^1/_2$''-stift en een plaat, gelast volgens het stiftlasprocédé met laspatronen. De door etsing zichtbaar gemaakte segregaties tonen aan dat het een stift en een plaat van ongekalmeerd staal betreft [4]).

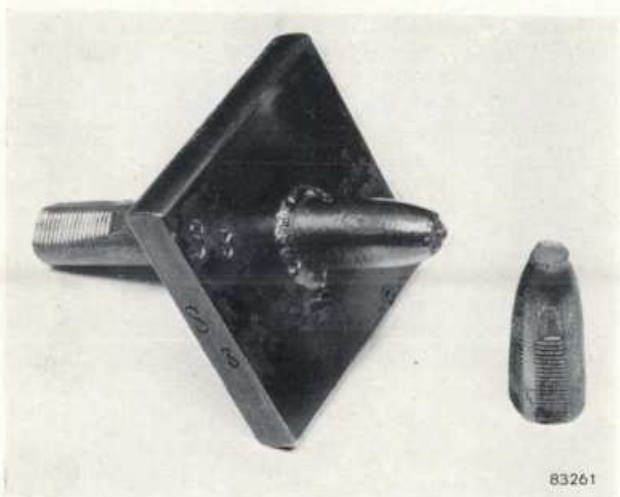
schroefdraad (fig. 13), tenzij de draad zelf door afschuiving bezwijkt.

Ook met stiften zonder draad kan men trek-

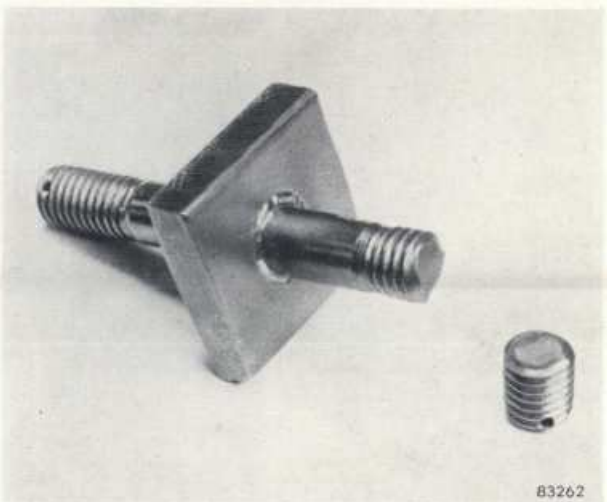
Fig. 13. Eenvoudige proeven omtrent de mechanische sterkte van de verbinding tussen stift en werkstuk. Rechts een stift die door hamerslagen over 90° is omgebogen; links een stift die is stukgetrokken door het schroeven van een moer tegen een om de stift geplaatst stukje pijp (op de foto reeds weggenomen). Het afgebroken stuk stift met de moer is geheel links te zien.

proeven doen. Daartoe last men op een plaat aan twee zijden een stift, zodanig dat de stiften in elkaars verlengde liggen. Men kan daarna het geheel in een trekbank plaatsen en een trekproef uitvoeren. Ook hier treedt de breuk nagenoeg steeds op buiten de las (*fig. 14a*).

Op een overeenkomstige wijze kan men vermoeiingsproeven uitvoeren. Een serie proefstukken werd onderworpen aan pulsatieproeven met een voorspanning van 0,25 kg/mm² (trek) en een maximale trekspanning die bij de verschillende proeven varieerde van 10 tot 20 kg/mm². Uit practische overwegingen werden stiften met schroefdraad gebruikt. Ook hier braken de proefstukken in de draad, dus buiten de las, (fig. 14*b*). Vermeld



a



b

Fig. 14. *a*) Resultaat van een trekproef aan twee, in elkaars verlengde, aan weerszijden van een plaat gelaste stiften.
b) Resultaat van een vermoeiingsproef.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zij nog dat voor stiften van zacht staal een sprongsterkte van ca. 15 kg/mm² werd gevonden.

Enige practische bijzonderheden

De laspatronen worden thans vervaardigd voor vier stiftdiameters, nl. $^1/_2$'', $^3/_8$'', $^5/_{16}$'' en $^1/_4$'' (resp. 12,7; 9,55; 7,9 en 6,35 mm). De diameter van de $^1/_2$''-stiften mag niet meer dan $\pm$ 0,3 mm, die van de andere stiften niet meer dan $\pm$ 0,2 mm afwijken van de nominale maat; bij een te geringe diameter zal de stift te vroeg door de laspatroon heen schieten, met als gevolg een te korte lasduur; bij een te dikke stift zal de lasduur te lang zijn.

De vereiste stroomsterkte bedraagt, indien met normale lastransformatoren wordt gelast, voor de vier genoemde stiftdiameters resp. 750, 500, 450 en 325 A. Deze waarden gelden indien gelast wordt op relatief dikke platen. Indien de platen dun zijn (dunner dan ongeveer de helft van de stiftdiameter) dient de stroom tot ongeveer 40 % lager te worden gekozen.

De open spanning van de lastransformator dient ten minste 70 V te zijn.

Over de samenstelling van het te lassen staal en stiftmateriaal werd terloops reeds iets gezegd in verband met hardingsverschijnselen. De eisen gesteld aan deze samenstelling zijn overigens niet hoog. Een al te sterke verontreiniging met slakinsluitingen, zoals bijv. werd aangetroffen bij stiftmateriaal van pakketteerstaal, dient te worden vermeden, daar dit tot te sterke porositeit kan leiden. Echter behoeft bijv. het zwavelgehalte niet speciaal gering te zijn. Stelt men aan de taaiheid van de las geen hoge eisen, dan kan men ook met zwavel gelegeerd automatenstaal volgens dit procédé lassen.[1]

Samenvatting. Er wordt een nieuw procédé voor het lassen van stiften loodrecht op een werkstuk beschreven. Bij dit procédé wordt een laspatroon op het uiteinde van de te lassen stift geschoven. Deze patroon is van halfgeleidend materiaal vervaardigd; haar functies zijn: het ontsteken van de boog, de fixering van de afstand tussen stift en werkstuk, de regeling van de lastijd. Bovendien vervult zij de metallurgische en andere functies die bij normale laselectrodes door de bekleding worden vervuld. De metallurgische werking van de laspatroon maakt het mogelijk staal van normale handelskwaliteit te gebruiken als materiaal voor de stiften; de stabiliserende werking op de boog veroorlooft de toepassing van wisselstroom. Het laspistool, dat dient om de stiften in de juiste positie op het werkstuk te houden, bevat alleen eenvoudige voorzieningen voor het vasthouden van de stift en voor het aandrukken van deze stift tegen het werkstuk, benevens een schakelaar voor het in- en uitschakelen van de stroom. Behalve een relais met transformator en een magnetische schakelaar voor de lastransformator, is geen hulpapparatuur nodig.

VOEDINGSAPPARATUUR VOOR DE LICHTBEBAKENING VAN VLIEGVELDEN

door Th. HEHENKAMP. 621.326.062:628.971.8:629.139.1

Het begrip resonantie is in de hoogfrequentietechniek schering en inslag, maar in de „sterkstroomtechniek" komt het slechts zelden op de voorgrond. Toch zijn er gevallen waarin een resonantieschakeling een goede oplossing vormt voor een bepaald sterkstroomvraagstuk; een voorbeeld is het vraagstuk dat hieronder ter sprake komt: het voeden van in serie geschakelde lampen met een constante stroom. Merkwaardig is dat het principe van zulke resonantieschakelingen — waaraan namen als Boucherot en Steinmetz zijn verbonden — al meer dan 60 jaar oud is. In de electrotechniek komt het niet vaak voor dat zo'n oud principe maar weinig toepassing heeft gevonden.

Opdat vliegtuigen ook bij duisternis of mist veilig kunnen landen, moeten de vliegvelden voorzien zijn van doelmatige lichtbakens. Onlangs is in dit tijdschrift een artikel verschenen waarin de moderne vliegveldbebakening uitvoerig is behandeld [1]). Zoals hierin werd medegedeeld, zijn de bakenlichten uitgerust met gloeilampen voor lage spanning (6 tot 30 V) — dit om een gedrongen gloeilichaam mogelijk te maken, waardoor het uitgestraalde licht beter kan worden gebundeld.

Directe parallelvoeding van deze lampen is onuitvoerbaar, de kabels zouden een veel te grote doorsnede moeten hebben. Directe serievoeding zou wel mogelijk zijn, maar heeft het bezwaar dat bij defect geraken van één lamp de gehele keten onderbroken wordt [2]). Daarom geeft men iedere lamp — onverschillig of parallel- dan wel serievoeding wordt

[1]) J. B. de Boer, Philips techn. T. **16**, 298-312, 1954 (No. 10).

[2]) Wel kan dit voorkomen worden door parallel aan elke lamp een speciale doorslagpatroon aan te brengen, zoals soms bij straatverlichting gebeurt (zie Philips techn. T. **6**, 105-109, 1941), maar voor vliegveldbebakening wordt deze oplossing niet betrouwbaar genoeg geacht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

toegepast — een eigen transformator, die voor aanpassing bij een gunstig gekozen netspanning resp. -stroom zorgt. Deze lamptransformatoren worden gefabriceerd voor verschillende vermogens en in verschillende uitvoeringen, al naar de gewenste opstelling (ingegraven in de grond, ingebouwd in het licht, enz.). De voeding geschiedt via een speciaal toestel, dat voorzien is van magnetische schakelaars voor het kiezen van de landingsbaan en van de lichtsterkte. Deze voedingstoestellen worden opgesteld in transformatorstations, die zo dicht mogelijk bij de landingsbanen zijn geplaatst, dikwijls ondergronds. De bediening kan geschieden in de transformatorstations zelf en ook vanuit de verkeerstoren, waarin daartoe een lessenaar met de nodige bedieningsorganen en controlelampen is geplaatst.

Alvorens op deze apparatuur nader in te gaan, moeten we de vraag onder ogen zien, hoe de primaire spoelen van de lamp transformatoren het best geschakeld kunnen worden: parallel of in serie.

Parallelvoeding of serievoeding?

Van de verschillende overwegingen waarop men de keuze van het voedingssysteem dient te baseren, zijn die van de investering en van de betrouwbaarheid de belangrijkste.

Investering

Om de investering laag te houden, zal men dunne kabels willen gebruiken. Daardoor moet men een groot spanningsverlies toelaten. Het energieverlies dat hiervan het gevolg is, heeft in het algemeen weinig te betekenen; de daaruit voortvloeiende kosten zijn gering in vergelijking met de afschrijving op de kabels (men bedenke dat met één landingsbaan van 3 km lengte al een bedrag in de orde van fl 50 000 aan kabels gemoeid kan zijn).

Nu leidt bij parallelvoeding het toelaten van een groot spanningsverlies tot een groot verschil in lichtsterkte tussen de lampen aan het begin en die aan het eind van de kabel. Bij serievoeding daarentegen heeft het spanningsverlies in het geheel geen lichtsterkteverschillen tot gevolg, daar immers door alle lampen dezelfde stroom loopt. Dit is een zeer belangrijk voordeel van het seriesysteem. Voordat echter geconcludeerd mag worden dat dit systeem dus het gunstigst is, moet een nauwkeuriger vergelijking worden gemaakt, door voor beide systemen het spanningsverlies te bepalen bij gelijke kabelkosten, of, ter vereenvoudiging, bij een zelfde kopervolume — wat bij benadering op gelijke kabelkosten neerkomt (het aantal aders maakt daarbij niet veel uit).

Wij beschouwen het geval van een landingsbaan (lengte l) waarlangs aan iedere kant op onderling gelijke afstanden n lichten zijn geplaatst, elk van een nominaal vermogen P; het aantal n bedraagt meestal 50 tot 100. Bij parallelschakeling (*fig. 1a*) zij de spanning bij de eerste lamp E_p (index p van parallel) en bij de laatste lamp $E_p - \Delta E_p$.

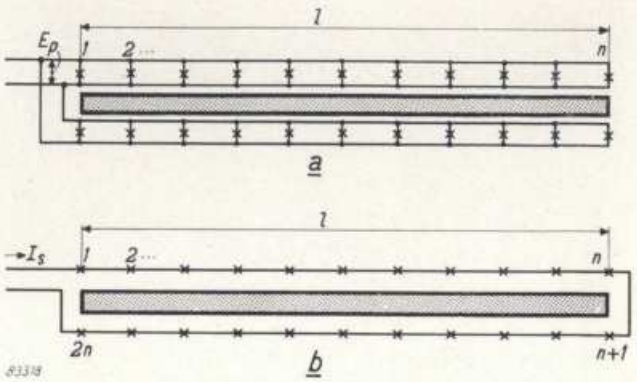


Fig. 1. Landingsbaan met n baanlichten aan iedere kant. *a*) Parallelvoeding. *b*) Serievoeding.

Wegens de positieve temperatuurcoëfficient van de weerstand van wolfraam zullen de lampstromen onderling veel minder verschillen dan de lampspanningen. Ter vereenvoudiging zien wij in de volgende berekening van de stroomverschillen geheel af en onderstellen wij dus dat alle lamptransformatoren de stroom $I_p = P/E_p$ ontvangen. Voor het spanningsverschil ΔE_p geldt dan:

$$\Delta E_p = \frac{n \varrho l P}{A_p E_p},$$

als A_p de doorsnede van een kabelader is en ϱ de soortelijke weerstand van koper. Het relatieve spanningsverschil bedraagt dus

$$e_p = \frac{\Delta E_p}{E_p} = \frac{n \varrho l P}{A_p E_p^2}. \quad \ldots \quad (1)$$

Wordt een zelfde bebakening in serie gevoed (fig. 1*b*), met een stroom I_s, dan is het spanningsverlies in de kabel:

$$\Delta E_s = \frac{2 \varrho l I_s}{A_s}$$

(index s van serie). De totale spanning over de serieschakeling is:

$$E_s = \frac{2nP}{I_s} + \Delta E_s.$$

Voert men ook hier het relatieve spanningsverlies in ($e_s = \Delta E_s / E_s$), dan geldt de volgende formule:

$$e_s (1 - e_s) = \frac{4n \varrho l P}{A_s E_s^2}. \quad \ldots \quad (2)$$

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Aangezien langs elke zijde van de baan bij parallelvoeding twee aders met de doorsnede A_p liggen, en bij serievoeding één ader met de doorsnede A_s, wordt aan de voorwaarde van gelijk kopervolume voldaan indien $2A_p = A_s$. Uit (1) en (2) volgt dan:

$$e_p E_p^2 = \tfrac{1}{2} e_s (1 - e_s) E_s^2.$$

Hebben de twee systemen dezelfde voedingsspanning ($E_p = E_s$), dan kunnen we de betrekking tussen e_p en e_s schrijven als volgt:

$$e_p = \tfrac{1}{2} e_s (1 - e_s). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Deze betrekking is in *fig. 2* grafisch weergegeven.

Omdat bij parallelschakeling het spanningsverschil tot uiting komt in lichtsterkteverschillen van de lampen, kan men met e_p zonder verdere maatregelen niet verder gaan dan circa 3%. (Hierbij is in aanmerking genomen dat zowel de lampen zelf als de optieken, en ook de instelling van de optieken, een zekere spreiding vertonen.) Volgens fig. 2 komt met $e_p = 3\%$ overeen: $e_s = 6\%$ in een serieschakeling met hetzelfde kopervolume en dezelfde voedingsspanning. Maar bij serieschakeling kan men zonder lichttechnische bezwaren e_s veel groter kiezen, bij voorbeeld 25% — en dus aanzienlijk op de kabels besparen —, mits slechts het voedingstoestel voor een overeenkomstig groter vermogen is berekend. Alleen dit laatste stelt ten slotte aan e_s een grens, welke doorgaans bij 25 tot 30% zal zijn bereikt.

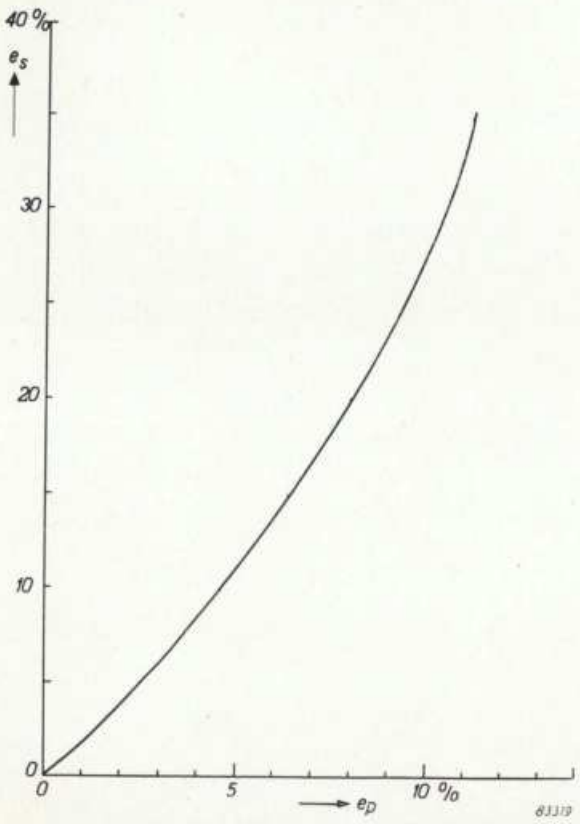


Fig. 2. Verband tussen de relatieve spanningsverliezen e_s bij serievoeding en e_p bij parallelvoeding, bij gelijk kopervolume, gelijke netspanning en gelijk totaal vermogen van de baanlichten.

Door bij parallelschakeling de lamptransformatoren te voorzien van geschikte aftakkingen, kan men met het feit dat bij de ver verwijderde lichten de spanning lager is dan bij de nabije, rekening houden. Dan kan men met e_p gaan tot circa 10%. (Bij nog grotere e_p zouden de lampen onderling toch weer te veel in lichtsterkte gaan verschillen wanneer ze op verminderde sterkte branden, doordat hun weerstand dan zo laag wordt dat de kabelweerstand grote invloed krijgt. Het branden op verminderde sterkte is, ter voorkoming van verblinding, regel; alleen bij mist overdag komt het voor dat de volle lichtsterkte nodig is.) Met $e_p = 10\%$ correspondeert in fig. 2 de waarde $e_s = 28\%$ in de serieschakeling. Beschouwt men dit als bovenste grens, dan valt hier weliswaar niet meer op de kabels te bezuinigen, maar de serieschakeling heeft het grote voordeel dat alle lampen gelijk branden, terwijl bij parallelschakeling met $e_p = 10\%$ de ongelijkmatigheid nog maar net toelaatbaar is.

In vele gevallen is de toestand nog ongunstiger voor de parallelschakeling. Men is namelijk eerder bereid hoge spanningen toe te laten in een serieketen dan in een parallelschakeling, omdat bij de eerste nergens punten met een groot onderling spanningsverschil dicht bij elkaar liggen (uitgezonderd dan in het transformatorstation). Isolatie- en veiligheidsproblemen zijn daardoor eenvoudiger op te lossen bij serieschakeling.

Betrouwbaarheid

Uit het oogpunt van betrouwbaarheid is het van groot belang dat kleine locale defecten en storingen zo weinig mogelijk invloed hebben. De transformatoren en de lichten zijn veelal in of dicht boven de grond gemonteerd, zodat verschillende klem- en drukcontacten (o.a. die van de lamphouder) zich in een corrosieve atmosfeer bevinden. Men moet dan ook altijd rekening houden met de mogelijkheid dat er merkbare overgangsweerstanden ontstaan. Nu is het een van de gunstige eigenschappen van serieschakelingen die met een van de belastingsweerstand onafhankelijke stroom worden gevoed, dat overgangsweerstanden geen invloed op de stroom in de keten hebben, maar dat alleen de spanning over het slechte contact wat toeneemt. Bovendien herstelt een electrisch geheel verbroken, maar mechanisch nog aanwezig, contact (zoals dat tussen lampvoet en -houder) zich gemakkelijk door de hoge spanning die bij het inschakelen van de installatie over dit contact komt te staan. Bij parallelvoeding zijn overgangsweerstanden veel hinderlijker; de desbetreffende lamp of groep van lampen komt er onderbelast door te branden, soms zo erg dat ze geen licht meer geeft.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een ander soort storingen wordt veroorzaakt door kortsluitingen. Zowel vliegtuigen als ander verkeer, en ook werkzaamheden langs de banen, kunnen er oorzaak van zijn dat er lichten mechanisch worden beschadigd, wat tot kortsluiting kan leiden. Bij een seriesysteem heeft dit in het ergste geval tot gevolg dat de beschadigde lichten uitvallen, terwijl de overige normaal blijven functioneren. Bij parallelvoeding echter moeten uitgebreide beveiligingsmaatregelen worden genomen; zo moet bij voorbeeld in serie met elk licht een veiligheid worden aangebracht. De plaatsing hiervan is meestal lastig. Bovendien is het moeilijk de veiligheid betrouwbaar te laten afschakelen; immers, de vrij grote kabelweerstand, die men om economische redenen toelaat, maakt dat de kortsluitstroom maar weinig groter is dan de normale werkstroom.

Nemen wij daarenboven nog in aanmerking dat men bij serieschakeling de voedingstoestellen en de lamptransformatoren gemakkelijker kan standaardiseren, en dat het opvangen van wijzigingen tijdens of na de aanleg bij dit systeem eenvoudiger is, dan zal het duidelijk zijn dat voor vliegveldbebakening over het algemeen serieschakeling de voorkeur verdient.

Een uitzondering hierop kunnen de naderingslichten vormen, vooral die van vrij groot vermogen. Hierbij is een groot aantal lichten, die samen dus een aanzienlijk vermogen opnemen, geconcentreerd op een beperkt terrein, dat buiten de landingsbanen is gelegen en waar de kans van beschadiging van lichten en kabels dus minder groot is. Daarom kunnen de naderingslichten met de bijbehorende lamptransformatoren op enige afstand boven de grond worden opgesteld, met het gevolg dat de omstandigheden waaronder de onderdelen van de installatie moeten werken, gunstiger zijn dan bij baanlichten. De kans op storingen is derhalve kleiner, en inspectie en onderhoud zijn eenvoudiger. Het aanbrengen van de, bij een parallelsysteem noodzakelijke, beveiligingen levert ook minder moeilijkheden op. Vaak is hier de beste oplossing een driefazig net, waarop de lichten, gelijkmatig over de drie fazen verdeeld, worden aangesloten.

Brugschakeling van Boucherot voor constante stroom

Om van de voordelen van serieschakeling volledig profijt te trekken, is het nodig dat men de keten voedt met een stroom die onafhankelijk is van de belastingsweerstand. Een bekende methode om dit te bereiken, maakt gebruik van een transformator met een beweeglijke secundaire spoel — een constructie die al sedert tientallen jaren wordt toegepast bij wegverlichtingen. De laatste 15 jaar is een andere oplossing in zwang gekomen, die geen beweeglijke onderdelen heeft. Het betreft een brugschakeling die afkomstig is van Boucherot (1890) en door Steinmetz nader is uitgewerkt [3]). Deze schakeling heeft in het ideale geval (afwezigheid van verliezen, en exacte resonantie) de volgende twee bijzondere eigenschappen:

1) de uitgangsstroom is onafhankelijk van de grootte en van de aard der belastingsimpedantie, en
2) bij weerstandsbelasting is de opgenomen stroom in faze met de spanning van het voedingsnet.

Vooral op de eerste eigenschap komt het hier aan; de andere wil alleen zeggen dat bij weerstandsbelasting de arbeidsfactor 1 is.

Beschouwing met verwaarlozing van verliezen

Om de bovengenoemde eigenschappen te bewijzen, beschouwen we een brugschakeling met twee impedanties Z_1 en twee impedanties Z_2 in de tegenover elkaar liggende takken (*fig. 3a*), een

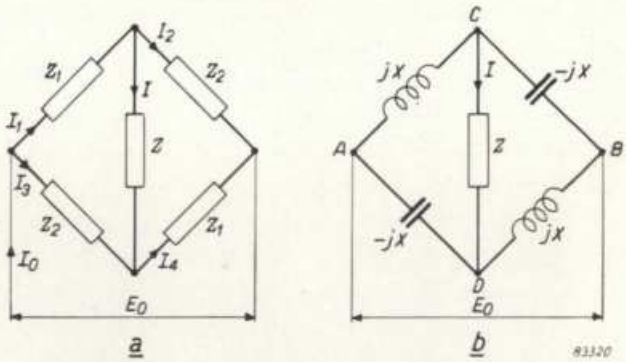


Fig. 3. *a*) Brugschakeling met twee impedanties Z_1 en twee impedanties Z_2 in de takken en een belastingsimpedantie Z in een diagonaal.
b) Maakt men in (*a*) $Z_1 = +jX$ en $Z_2 = -jX$, dan ontstaat de brug van Boucherot, waarvoor geldt dat de stroom I door Z onafhankelijk van Z is.

impedantie Z in de ene diagonaal en een voedende spanning E_0 over de andere diagonaal. Uit de vergelijkingen (voor de notatie verwijzen we naar fig. 3*a*)

$$I = I_1 - I_2$$

en

$$E_0 = I_1 Z_1 + I_2 Z_2$$

volgt na elimineren van I_1:

$$I = \frac{E_0 - I_2(Z_1 + Z_2)}{Z_1}. \quad \ldots \quad (4)$$

We kiezen nu Z_1 en Z_2 als volgt:

$$Z_1 = -Z_2 \quad \ldots \quad (5)$$

(wat o.a. inhoudt dat zij samen resoneren op de netfrequentie). Uit (4) volgt nu:

$$I = \frac{E_0}{Z_1}, \quad \ldots \quad (6)$$

[3]) Zie bijv. R. R. Miner, Resonant-type constant-current regulators, Trans Amer. Inst. El. Engrs. **58**, 822-829, 1939.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

en hieruit blijkt dat inderdaad de uitgangsstroom I onafhankelijk van de belastingsimpedantie Z is.

Voor de uit het net opgenomen stroom I_0 geldt:

$$I_0 = I_1 + I_3,$$

terwijl ook

$$I_1 Z_1 + IZ - I_3 Z_2 = 0.$$

Elimineren van I_1 uit deze twee vergelijkingen levert:

$$I_0 = \frac{I_3(Z_1 + Z_2) - IZ}{Z_1},$$

wat met behulp van (5) en (6) overgaat in

$$I_0 = -\frac{Z}{Z_1^2} E_0. \quad \ldots\ldots \quad (7)$$

Aan de resonantievoorwaarde (5) kan alleen streng voldaan zijn indien Z_1 en Z_2 verliesvrij zijn, dus indien zij zuivere reactanties zijn: $Z_1 = jX$ en $Z_2 = -jX$ (fig. 3*b*). In (7) is de noemer, Z_1^2, dus reëel, en we zien dat de opgenomen stroom in faze met de voedingsspanning E_0 is indien de belastingsimpedantie Z een zuivere weerstand is. Hiermee is ook de tweede eigenschap bewezen.

De schakeling heeft nog een derde merkwaardige (maar ongewenste) eigenschap, en wel dat de vier takstromen I_1, I_2, I_3 en I_4 niet afzonderlijk bepaald zijn; toepassing van de wetten van Kirchhoff op de knooppunten en de mazen van de brug levert namelijk een stel afhankelijke vergelijkingen. Wèl bepaald zijn de sommen van de stromen in tegenover elkaar liggende takken:

$$I_1 + I_4 = I\left(1 - \frac{Z}{Z_1}\right) \quad \ldots\ldots \quad (8)$$

en

$$I_2 + I_3 = -I\left(1 - \frac{Z}{Z_1}\right). \quad \ldots\ldots \quad (9)$$

Met de beperking dat aan (8) en (9) voldaan moet zijn, kunnen de takstromen willekeurige waarden aannemen. Dit is ook wel duidelijk, als men bedenkt dat de impedantie van de keten *ABCDA* (fig. 3*b*) nul is, zodat er een willekeurige stroom in kan lopen zonder dat dit invloed heeft op de diagonaalspanningen.

Wij merken in dit verband op dat de onbepaaldheid alleen bestaat in het geval van resonantie èn verliesvrije schakelelementen, zoals uit het volgende zal blijken. Algemeen geldt:

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 \quad \ldots\ldots \quad (10)$$

en

$$I_1 Z_1 + I_2 Z_2 = I_3 Z_2 + I_4 Z_1.$$

Hieruit volgt:

$$(I_1 - I_4) Z_1 = -(I_1 - I_4) Z_2. \quad \ldots\ldots \quad (11)$$

Is nu $Z_1 \neq -Z_2$ (hetzij doordat Z_1 en Z_2 een weerstandsterm bevatten, hetzij doordat van resonantie is afgeweken, hetzij door beide oorzaken), dan volgt uit (11) en (10):

$$I_1 = I_4 \text{ en } I_2 = I_3 \quad \ldots\ldots \quad (12)$$

Blijkbaar zijn de vier takstromen bepaald bij iedere afwijking van (5) en zijn ze alleen dan onbepaald indien aan (5) voldaan is — hetgeen echter juist de voorwaarde is om aan de schakeling de gewenste eigenschap van constante stroom te geven (verg. (6)). Deze tegenspraak leidt in de practijk tot een compromis, zoals we hieronder zullen zien.

Beschouwing met verliezen in aanmerking genomen

In werkelijkheid zal de brugschakeling afwijken van het hierboven gestelde, zuiver theoretische, geval. De schakelelementen zijn namelijk niet verliesvrij. Wel zijn in de regel de verliezen in de condensatoren zo klein dat zij geen rol van betekenis spelen, maar de verliezen in de spoelen kunnen om economische redenen niet zo gering gemaakt worden dat hun invloed verwaarloosd zou mogen worden. Wij hebben nu dus na te gaan waarin deze invloed bestaat.

Bij niet-verliesvrije schakelelementen kan niet streng aan (5) voldaan zijn en zou, volgens wat we zoëven hebben gezien, de onbepaaldheid dus opgeheven zijn. De practijk wijst echter uit dat de stromen nog ontoelaatbaar sterk van allerlei toevallige omstandigheden afhankelijk zijn; de ene condensatorspanning kan bij voorbeeld wel 5 maal zo groot zijn als de andere. Dit is natuurlijk hoogst ongewenst; de condensatoren en de spoelen zouden sterk overgedimensioneerd moeten worden.

Er zijn verschillende middelen om deze ongewenste toestand te vermijden. Volgens (12) zijn, bij afwijking van (5), de stromen in de spoelen in principe gelijk en onderling 180° verschoven, en slechts door toevallige omstandigheden zijn de stromen in werkelijkheid meestal ongelijk. Gelijkheid kan men verkrijgen door de twee spoelen op een gemeenschappelijke ijzerkern aan te brengen (*fig. 4a*). Een variant op deze methode bestaat hierin dat men de twee condensatoren met elkaar koppelt door middel van een hulptransformator 1 : 1, die ervoor zorgt dat de condensatorspanningen aan elkaar gelijk blijven (fig. 4*b*).

Volgens een andere methode — en deze wordt in de Philips toestellen toegepast — wijkt men van de voorwaarde (5) niet alleen noodgedwongen af

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(doordat er nu eenmaal verliezen zijn), maar ook bewust, door niet precies op resonantie in te stellen. Men vermijdt daardoor niet alleen de ondanks verliezen resterende ombepaaldheid van de takstromen, maar tevens het gevaar dat bij uitvallen van talrijke lampen de overblijvende overbelast zouden worden (op deze laatste kwestie komen we straks terug, onder het hoofd Lamptransformatoren). Hoe ver men met het verstemmen kan gaan, hangt natuurlijk af van de mate waarin de constantheid van de uitgangsstroom erdoor verloren gaat. Wij willen daarom de berekening van de uitgangsstroom nogmaals uitvoeren, nu in de onderstelling dat van de voorwaarde (5) in beide opzichten is afgeweken.

De algemene vergelijking voor de uitgangsstroom I is:

$$I = \frac{Z_2 - Z_1}{ZZ_1 + ZZ_2 + 2Z_1Z_2} E_0 . \quad . \quad . \quad (13)$$

De belastingsimpedantie Z, gevormd door de in serie geschakelde lamptransformatoren, die elk met een gloeilamp zijn belast [4]), is nagenoeg een zuivere weerstand (R). Realiseren we Z_2 door een spoel met zelfinductie L en verliesweerstand r, en Z_1 door een als verliesvrij te beschouwen condensator met capaciteit C, dan is dus, bij een hoekfrequentie ω van het net:

$$Z = R, \qquad Z_1 = \frac{1}{j\omega C}, \qquad Z_2 = r + j\omega L.$$

Voeren we nu twee parameters in, waarvan de ene, $v = r/R$, samenhangt met de verliezen, en de andere,

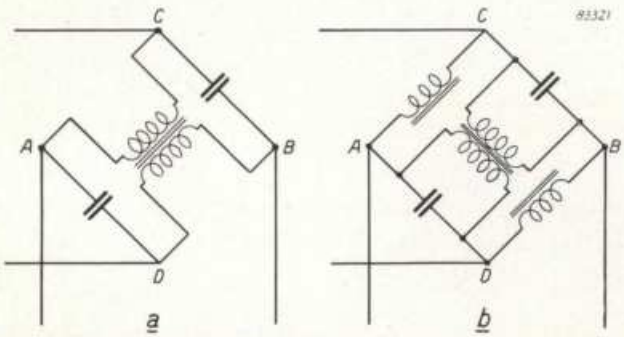


Fig. 4. De onbepaaldheid van de vier takstromen in de brug van Boucherot kan worden opgeheven door de twee spoelen op één kern aan te brengen (*a*), of door de condensatoren over een transformator 1 : 1 met elkaar te koppelen (*b*).

$p = \omega/\omega_0$ (met $\omega_0^2 = 1/LC$), met de verstemming, dan kunnen we (13) in deze vorm brengen:

$$I = \frac{E_0}{R} f(p,v).$$

[4]) Het geval van onbelaste transformatoren (defecte lampen) wordt verderop behandeld.

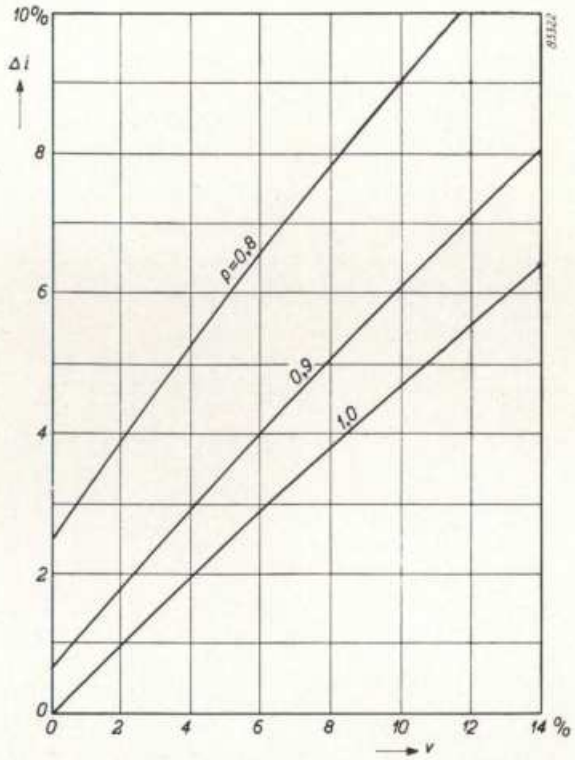


Fig. 5. Het relatieve stroomverschil Δi in afhankelijkheid van het relatieve verlies v in de brug van Boucherot. Parameter is de verstemming p. Nagenoeg dezelfde krommen gelden voor de reciproke waarden van p.

De grootste waarde van de stroom, I_{max}, treedt op bij kortsluiting ($R = 0, v = \infty$). Het relatieve stroomverschil, $\Delta i = (I_{max} - I)/I$, nemen we als maat voor de afwijking van stroomconstantheid.

In *fig. 5* is Δi uitgezet als functie van v, met p als parameter. Uit deze figuur zien we dat Δi maar weinig toeneemt als we verstemmen van $p = 1$ (resonantie) tot $p = 0{,}9$ of 1,1, mits v niet te groot is. Bij $v = 6\%$ bij voorbeeld neemt Δi dan toe van 3% tot 4%; verdere verstemming echter maakt dat Δi snel toeneemt. Een verstemming tot $p = 0{,}9$ nu is al een zeer werkzaam middel om de onbepaaldheid van de takstromen drastisch te verminderen, vooral als men bovendien één der methodes van fig. 4 toepast.

Beschrijving van een uitgevoerd voedingstoestel

De bovenstaande theoretische beschouwingen hebben bij Philips geleid tot het ontwerpen van een reeks voedingstoestellen voor vermogens van 1,5 tot 25 kVA. De schakeling, enigszins vereenvoudigd, vindt men in *fig. 6*. *ABCD* is de brug van Boucherot. De ingangsdiagonaal, *AB*, is aangesloten op de hoogspanningswikkeling van een transformator T_1, die aan de primaire zijde uit het net wordt gevoed. De primaire spoel is voorzien van aftakkingen, zodat men rekening kan houden met de gemiddelde

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

netspanning ter plaatse (uit (6) blijkt immers dat I evenredig met de voedingsspanning E_0 van de brug varieert).

Meestal wenst men de lichtsterkte in enige trappen te kunnen regelen. Dan zijn ook aan de secundaire zijde van T_1 aftakkingen aangebracht en kan de brug door middel van magnetische schakelaars S_2, S_3, S_4 — de lichtsterktekiezers — naar keuze met één van deze aftakkingen worden verbonden. Het is duidelijk dat nimmer meer dan één lichtsterktekiezer tegelijk bekrachtigd mag zijn, omdat anders de transformator T_1 kortgesloten zou zijn. Daarom zijn de lichtsterktekiezers onderling vergrendeld.

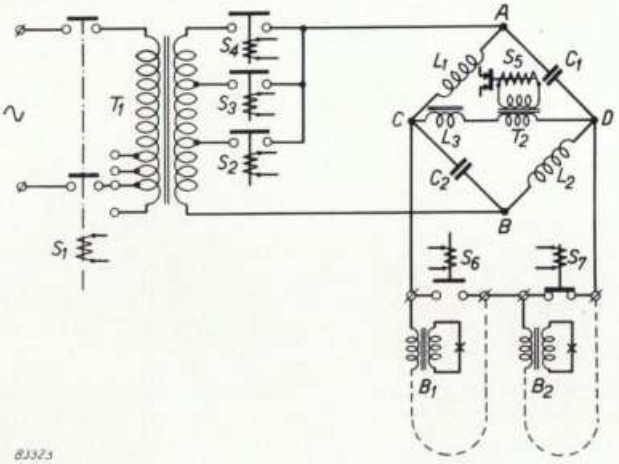


Fig. 6. Vereenvoudigd schakelschema van een voedingsapparaat voor klein vermogen. S_1 hoofdschakelaar. T_1 scheidingstransformator. S_2, S_3, S_4 lichtsterktekiezers (waarvan het aantal kan variëren van 0 tot 5). $ABCD$ brug van Boucherot. L_3 smoorspoel ter begrenzing van de uitgangsspanning bij onderbreking van de baanketen. T_2 stroomtransformator. S_5 relais, dat bij bekrachtiging de hoofdschakelaar S_1 doet uitvallen. B_1, B_2 ketens van baanlichten. S_6, S_7 baankiezers.

De uitgangsklemmen van de brug, C en D, zijn verbonden met de keten van baanlichten — hetzij rechtstreeks, indien de spanning over de serieschakeling lager dan 1500 V is, hetzij via een transformator (niet getekend), bij hogere spanningen. Vaak zal één voedingstoestel twee of meer ketens afwisselend kunnen bedienen, bij voorbeeld voor de twee richtingen van een landingsbaan, of twee landingsbanen waarvan òf de ene òf de andere in gebruik is. Men schakelt dan deze ketens in serie en overbrugt elk door een magnetische schakelaar, de baankiezer (in fig. 6 zijn twee ketens getekend, en dus ook twee baankiezers, S_6 en S_7). Bij landingsbanen mag slechts één keten tegelijk branden en dan moeten dus ook de baankiezers onderling vergrendeld zijn. Van rijbanen daarentegen moeten de lichten dikwijls in allerlei combinaties gelijktijdig kunnen branden.

Vergrendelingssysteem

Voor het onderling vergrendelen van magnetische schakelaars kent men verschillende methodes. Gewoonlijk wordt daarbij gebruik gemaakt van hulpcontacten, die de verbinding met de bekrachtigingsspoelen van de schakelaars kunnen onderbreken. Is het aantal te vergrendelen schakelaars groot, dan heeft men zeer veel hulpcontacten nodig, wat het gevaar van storingen niet denkbeeldig maakt.

Daarom hebben wij een systeem ontwikkeld waarvan de werking zeer betrouwbaar is gemaakt doordat is gestreefd naar een minimaal aantal hulpcontacten. Het systeem berust hierop dat de bekrachtigingsspoel van een magnetische schakelaar in de aangetrokken toestand een veel grotere impedantie heeft dan in de onbekrachtigde toestand. In het schema (*fig. 7*) ziet men dat alle bekrachtigingsspoelen aan één zijde met een punt P zijn verbonden, en dat P over de serieschakeling van een condensator C_1 en een spoel L aan één pool (*1*) van het stuurspanningsnet is gelegd. De andere zijde van iedere bekrachtigingsspoel kan met de pool *2* van dit net worden verbonden over een bij de schakelaar behorende drukknop (D_1, D_2,...). De contacten OC zijn de normale overneemcontacten, elk parallelgeschakeld met de bijbehorende drukknop. De contacten CC zijn hulpcontacten, die de condensator C_1 kunnen overbruggen met een lage weerstand R (d.i. practisch kortsluiten). De serieschakeling C_1-L resoneert op de netfrequentie en heeft dus een lage impedantie.

Onderstellen wij nu dat men op de knop D_1 drukt. De spoel van de schakelaar S_1 wordt dan op de normale wijze bekrachtigd en zowel het (niet getekende) hoofdcontact van S_1 als het overneemcontact OC en het hulpcontact CC worden dus gesloten. Bij het sluiten van CC wordt de condensator C_1 „kortgesloten" over de weerstand R (die als dempweerstand dient, om de sluitingsvonk te beperken). Tussen de punten P en *1* bevindt zich nu practisch alleen nog de spoel L. (Zonder verdere maatregelen zou, wegens het spanningsverlies in L, de spanning over de spoel van S_1 nu ca. 10 % lager zijn dan de stuurspanning. Om ook onder de ongunstigste omstandigheden te voorkomen dat S_1 zou uitvallen, is de condensator C_2 aangebracht, die samen met de spoel van S_1 een grotere impedantie vormt dan deze spoel alleen.)

Wordt nu knop D_2 ingedrukt, dan komt de spoel van S_2 parallel te staan met die van S_1, en deze twee spoelen samen in serie met L. De spoel van de nog niet aangetrokken schakelaar

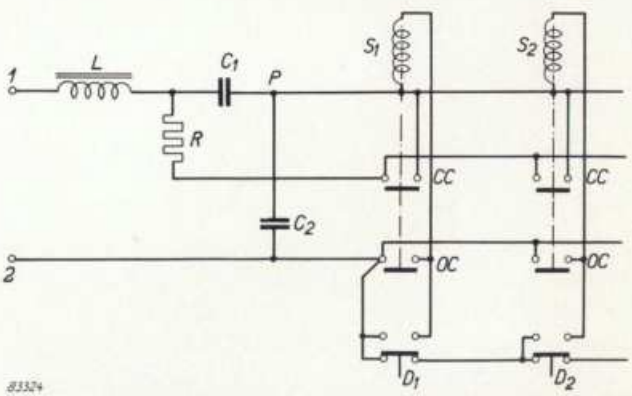


Fig. 7. Vergrendelingsmechanisme, dat voorkomt dat twee of meer schakelaars (met bekrachtigingsspoelen S_1, S_2,...) tegelijk in staan. *1*, *2* klemmen van het stuurspanningsnet. L-C_1 resonantieketen. R dempweerstand. CC kortsluitcontacten van C_1. OC overneemcontacten. C_2 hulpcondensator. D_1, D_2, ... drukknoppen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

S_2 heeft een lage impedantie, zodat het grootste deel van de stuurspanning nu wordt opgenomen door L. De spoel van S_2 wordt daardoor niet voldoende bekrachtigd om deze schakelaar te sluiten, terwijl de bekrachtiging van S_1 zo zwak wordt dat S_1 opengaat. Maar dan wordt de kortsluiting van C verbroken, de keten L-C_1 neemt weer een lage impedantie aan, en S_2 wordt nu zo sterk bekrachtigd dat deze schakelaar sluit.

Het aantal schakelaars kan naar willekeur worden uitgebreid. Steeds zal er slechts één gesloten kunnen zijn. Wordt op de knop van een willekeurige andere schakelaar gedrukt, dan valt de instaande schakelaar uit, en de bij de ingedrukte knop behorende schakelaar wordt gesloten. Het in *fig. 8* afgebeelde oscillogram laat zien dat er $3\frac{1}{2}$ periode verloopt tussen het opengaan van de ene schakelaar en het sluiten van de andere.

Om te voorkomen dat twee of meer schakelaars tegelijk zouden worden bediend (doordat twee of meer knoppen tegelijk worden ingedrukt), zijn de drukknoppen op de gebruikelijke manier met elkaar in serie geschakeld.

Een nadere beschouwing leert dat het gunstig is, de keten L-C_1 niet precies op de netfrequentie af te stemmen, omdat een kleine verstemming de schadelijke invloed van de weerstand van de stuurstroomkabel sterk vermindert. Men kan zodoende deze invloed zelfs nog veel kleiner maken dan bij de gebruikelijke vergrendelingsschakelingen, zodat dus langere en/of dunnere stuurstroomkabels mogelijk zijn.

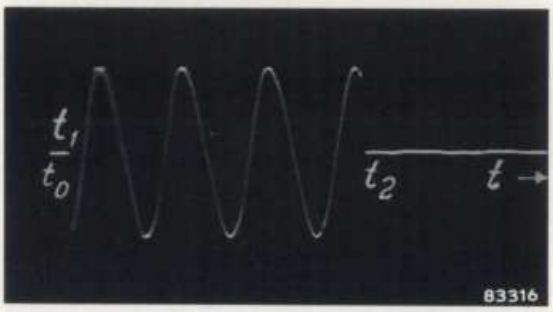


Fig. 8. Oscillogram behorende bij fig. 7. Bij $t = t_0$ werd de drukknop van S_2 bediend terwijl S_1 in stond. Met een zekere vertraging, gegeven door de constructie van S_1, openen de contacten van S_1, bij $t = t_1$. Een hulpspanning, met frequentie 50 Hz, verschijnt nu op de oscillograaf, en verdwijnt zodra S_2 sluit (bij $t = t_2$). Het interval t_1-t_2 blijkt $3\frac{1}{2}$ periode te duren.

Begrenzing van de uitgangsspanning

Indien de uitgangsketen onderbroken mocht geraken — bij voorbeeld door beschadiging van de kabel —, zou de spanning tot een hoge waarde oplopen. Om dit te voorkomen, is tussen de uitgangsklemmen C en D een hulpketen aangebracht, bestaande uit een smoorspoel L_3 en een stroomtransformator T_2 (fig. 6). De spoel L_3 is zo gedimensioneerd dat ze, bij normale waarden van de spanning tussen C en D, een grote zelfinductie heeft, zodat er slechts een verwaarloosbare stroom door loopt. Gaat echter, als gevolg van een onderbreking in de uitwendige keten, de spanning oplopen, dan raakt de kern van L_3 verzadigd en de spanning blijft beperkt tot minder dan het dubbele van de nominale waarde (*fig. 9*), ondanks het feit dat nu de gehele stroom door de hulpketen loopt. Deze stroom bekrachtigt, via de stroomtransformator, een relais (S_5). Het rustcontact hiervan, dat in serie met de bekrachtigingsspoel van de hoofdschakelaar S_1 (fig. 6) staat, gaat dus open, zodat het gehele voedingsapparaat, als gevolg van de onderbreking in de uitgangsketen, van het net wordt afgeschakeld.

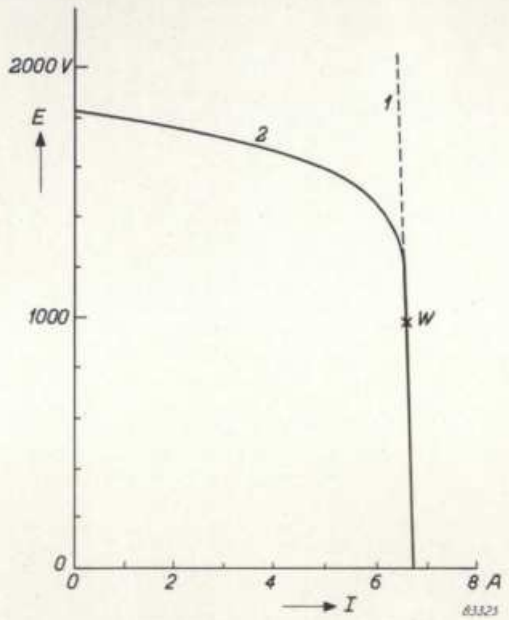


Fig. 9. Uitgangsspanning E als functie van de stroom I in de uitwendige keten, *1* zonder, *2* met de begrenzingsinrichting L_3-T_2 (fig. 6). W werkpunt bij volle belasting.

Mechanische uitvoering

Alle onderdelen van het voedingstoestel zijn gemonteerd in een kast, die aan de voorzijde een bedieningspaneel heeft (*fig. 10*). Op dit paneel zijn aangebracht een ampèremeter, die de uitgangsstroom aanwijst, en de drukknoppen waarmee de hoofdschakelaar, de lichtsterktekiezers en de baankiezers worden bediend. Het paneel kan worden afgesloten met een deksel, dat tevens door middel van een deurcontact de stuurleidingen voor de afstandsbediening inschakelt; bij geopend deksel is dus wèl bediening ter plaatse mogelijk, maar afstandsbediening niet, en bij gesloten deksel omgekeerd.

De afstandsbediening van de verschillende op een vliegveld aanwezige bakensystemen geschiedt gewoonlijk vanuit de verkeerstoren. Hier is dan een paneel of lessenaar opgesteld, waarop alle bedieningsorganen voor de bakenlichten overzichtelijk zijn gegroepeerd. Aan controlelampen kan men direct zien welke bakensystemen in gebruik zijn, en

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

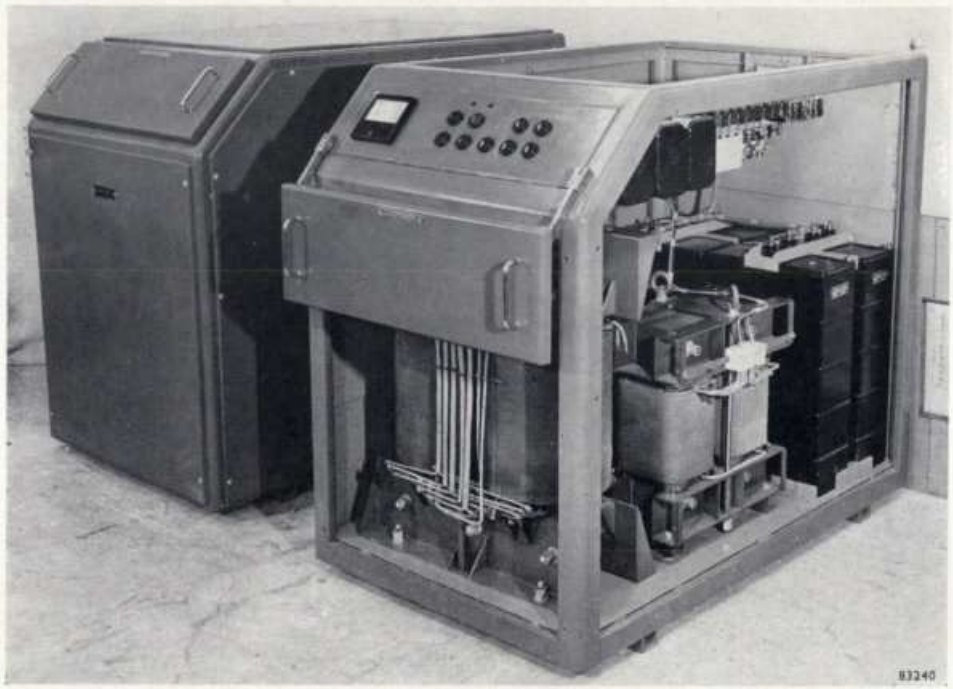


Fig. 10. Twee voedingstoestellen, elk voor 25 kVA, 20 A, het rechtse met geopend deksel en afgenomen wanden. Op het schuine paneel: ampèremeter en drukknoppen. Onder zijn te zien: de scheidingstransformator, één van de spoelen uit de brugtakken, en de condensatoren; bovenin de magnetische schakelaars.

met welke lichtsterkte. Een bijzonder goed overzicht wordt verkregen indien de controlelampen zijn aangebracht op een plattegrond van het vliegveld, op de plaatsen die corresponderen met de werkelijke lichten. *Fig. 11* geeft een voorbeeld van zulk een bedieningslessenaar.

De lamptransformatoren

Zoals reeds in de inleiding werd opgemerkt, is elke lamp via een eigen transformator in de serieketen opgenomen. De electrische eigenschappen van deze transformatoren zijn van groot belang als men ten volle de voordelen van de serieschakeling wil

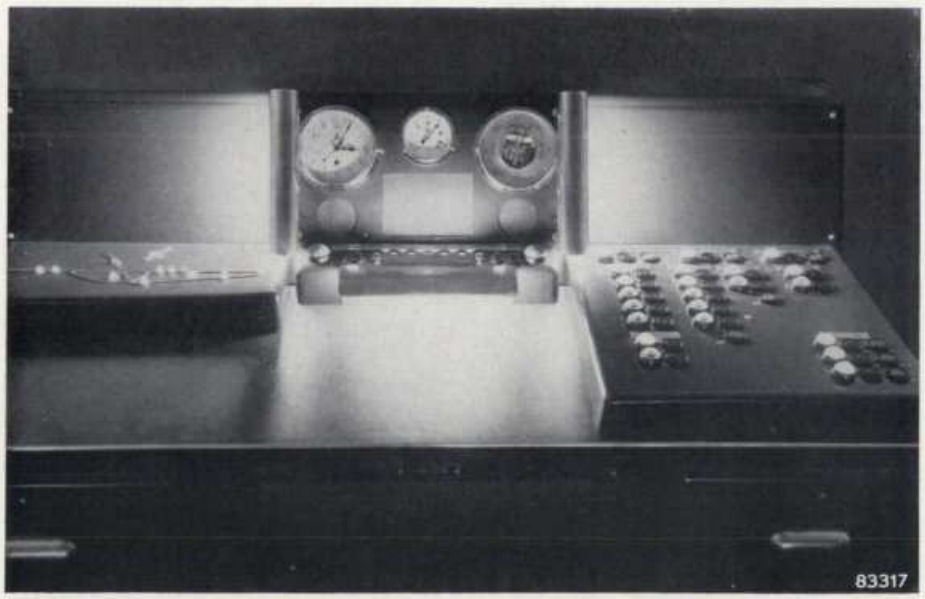


Fig. 11. Bedieningslessenaar, met links plattegrond van het vliegveld, waarop controlelampjes zijn aangebracht op de plaatsen die corresponderen met de werkelijke baanlichten, en rechts drukknoppen met signaallampjes van de hoofdschakelaars en baan- en lichtsterktekiezers. Achteraan, in het midden, klok en meteorologische instrumenten, aan weerszijden daarvan ruimte voor telecommunicatie-apparatuur.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bereiken, en van de mechanische uitvoering ervan is grotendeels de betrouwbaarheid van de gehele installatie afhankelijk.

Electrische karakteristiek

Wat de electrische eigenschappen betreft — in de eerste plaats moet de stroom door de lamp goed constant blijven, ondanks het feit dat de lampspanning, gemeten bij de nominale stroom, bij de verschillende exemplaren van een zelfde type een zekere spreiding vertoont, en ondanks het eventueel optreden van overgangsweerstand in serie met de lamp. Dit betekent dat de transformator een typische stroomtransformatorkarakteristiek moet hebben.

Verder moet, wanneer een lamp defect is of uit de houder is genomen, de spanning aan de houder niet te hoog oplopen; anders zou het inzetten van de lamp gevaar kunnen opleveren.

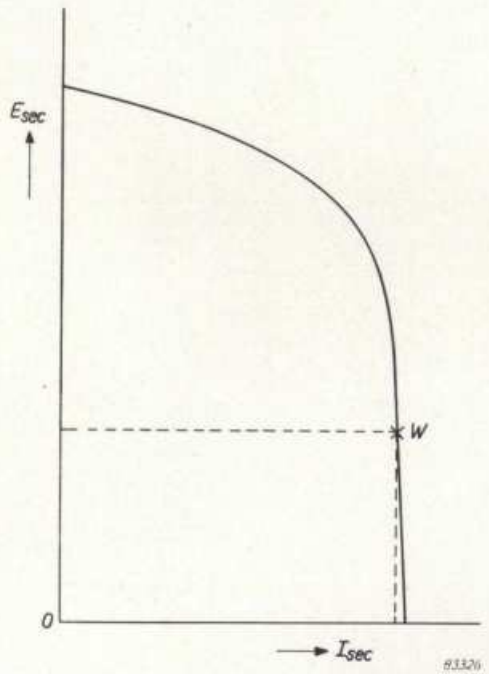


Fig. 12. Verband tussen de secundaire spanning E_{sec} en de secundaire stroom I_{sec} van een lamptransformator, belast met een variabele weerstand. De primaire wikkeling was opgenomen in een serieschakeling, die door een brug van Boucherot werd gevoed. Bij het werkpunt W moet de kromme steil lopen, en bij $I_{sec} = 0$ moet de spanning niet te hoog worden.

Aan beide eisen wordt voldaan door een transformator met een karakteristiek als in *fig. 12* is afgebeeld (secundaire spanning als functie van secundaire stroom). Bij het werkpunt loopt de kromme zo steil dat 10 % extraweerstand in de secundaire kring de stroom slechts circa 0,5 % doet dalen, en in onbelaste toestand is de spanning niet hoger dan 3 maal de werkspanning. Dit laatste is verkregen door ervoor te zorgen dat de ijzerkern van de transformator in onbelaste toestand verzadigd is.

De verzadiging gaat met vervorming van de primaire stroom gepaard. De uitgangsstroom van het voedingstoestel is dus vervormd als één of meer lamptransformatoren niet belast zijn. Het blijkt dat deze stroom daardoor in effectieve waarde toeneemt. Dit is natuurlijk ongewenst. Wanneer een vrij groot aantal lampen in een kort tijdsverloop defect raakt, dan kan de stroom in de keten aanmerkelijk oplopen, waardoor de resterende lampen sterk overbelast worden. Op vliegvelden voor de burgerluchtvaart is dit verschijnsel van minder belang, omdat daar een regelmatige controle wordt uitgeoefend en defecte lampen snel worden vervangen. Op militaire vliegvelden echter moet men wel degelijk met de mogelijkheid van een belangrijk aantal defecte lampen, bij voorbeeld als gevolg van oorlogshandelingen, rekening houden. Hier zal men dus verlangen dat de stroom in de serieketen weinig afhangt van het percentage defecte lampen. Dit nu is te bereiken door de brugschakeling enigszins te verstemmen (p iets te laten afwijken van 1) — een middel waarvan wij boven hebben laten zien dat het ook werkzaam is ter opheffing van de onbepaaldheid der takstromen. Nodig is evenwel dat de voedingsapparaten en de lamptransformatoren goed bij elkaar passen; afhankelijk van de transformatorkarakteristiek moet namelijk de verstemming van de brug worden gekozen.

Constructieve uitvoeringen van de lamptransformatoren

De lamptransformatoren worden vervaardigd voor lampvermogens van 30 tot 500 W, en ook in verschillende uitvoeringsvormen.

Als de transformator moet worden ingebouwd in een baanlicht of in een bovengronds geplaatste gesloten kast, kan men met de eenvoudigste uitvoeringsvorm volstaan. Daarbij is de transformator, geheel door een vochtafsluitende smeltmassa omgeven, geplaatst in een plaatijzeren doos, die voorzien is van keramische isolatoren voor de aansluitingen (*fig. 13.*)

Zwaardere eisen moeten worden gesteld aan transformatoren die nabij het licht in een putje worden opgesteld of geheel in de grond worden begraven. De omhulling moet dan bestand zijn tegen de corrosieve werking van de grond. Daarom plaatst men de transformator in zulke gevallen in een zware gietijzeren bak met afneembaar deksel, en bedekt men de bak uitwendig met een beschermende asfaltmassa. De transformator is al bij aflevering

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 13. Drie transformatoren in de eenvoudigste uitvoeringsvorm, gemonteerd in een verzonken baanlicht (vgl. fig. 21 van het in [1]) aangehaalde artikel). In het deksel, waarvan men de onderzijde ziet, één rondschijnend toplicht en twee bundellichten (voor iedere landingsrichting één).

Fig. 14. Rijbaanlicht, gemonteerd op een in te graven transformator in gietijzeren bak, volgegoten met smeltmassa. Uitvoering voor aansluiting van gearmeerde kabels.

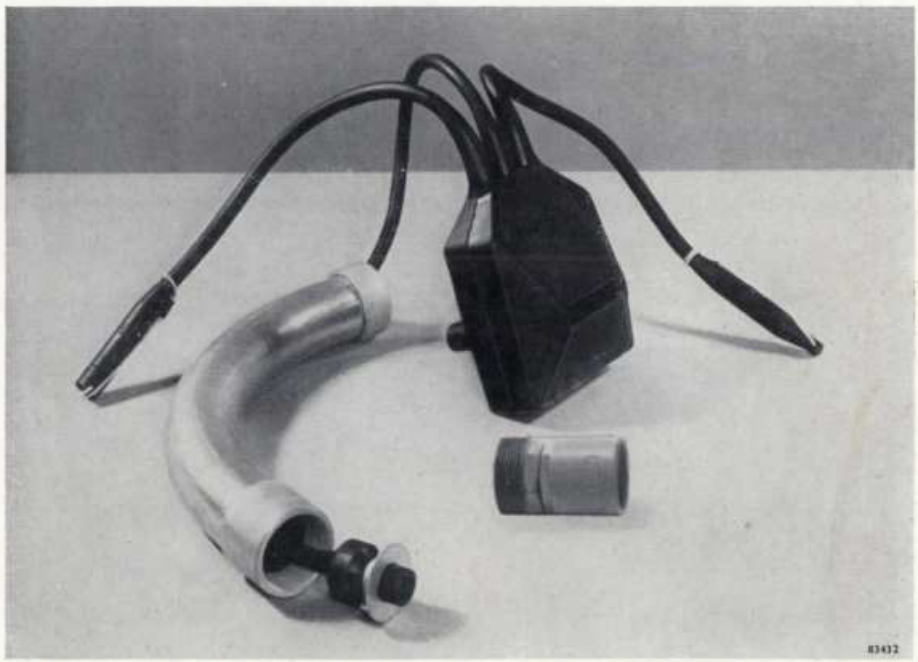


Fig. 15. Lamptransformator voor 200 W, 6,6 A, geschikt voor ketens met 5000 V voedingsspanning. Hij is volledig omgeven door rubber, dat één geheel vormt met de isolatie van de aansluitkabels. De secundaire kabel (door de pijp gestoken) eindigt in een stopcontact. Wordt het licht omvergereden, dan breekt de breekkoppeling — het ingesnoerde pijpje vóór de transformator — af (vgl. het artikel [1]), blz. 308) en wordt de steker uit het secundaire stopcontact getrokken. Geheel links en rechts de primaire aansluitingen, hier nog afgesloten met dopjes, zoals tijdens vervoer en opslag wenselijk is ter voorkoming van corrosie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

door de fabriek geheel door smeltmassa omgeven; slechts de porseleinen isolatoren met de aansluitklemmen blijven vrij. Bij de montage op het vliegveld worden de kabels aangesloten, het deksel bevestigd en de resterende ruimte in de bak geheel met smeltmassa volgegoten. Indien ongearmeerde kabels worden gebruikt, geïsoleerd met een kunststof zoals „Neoprene", is de transformatorbak voorzien van wartelinvoeren; voor gearmeerde kabels zijn invoeren aangebracht zoals bij kabelmoffen gebruikelijk zijn (*fig. 14*).

Een recente ontwikkeling op het gebied van transformatoren die in de grond gebruikt moeten worden, is de uit Amerika afkomstige uitvoering waar een hermetisch sluitende rubbermantel omheen is geperst [5]). Ook Philips heeft transformatoren in deze uitvoering (*fig. 15*). De waterdichte rubbermantel is één geheel met de rubberisolatie van de aansluitingen. Deze bestaan uit korte stukken kabel met aangevulcaniseerde stekercontacten. De transformator is op deze wijze tegen alle corrosieve invloeden beschermd en toch goed hanteerbaar. Het monteren, dat zeer snel kan geschieden, is zo eenvoudig dat het door ongeschoold personeel kan gebeuren. *Fig. 16* toont het inwendige.

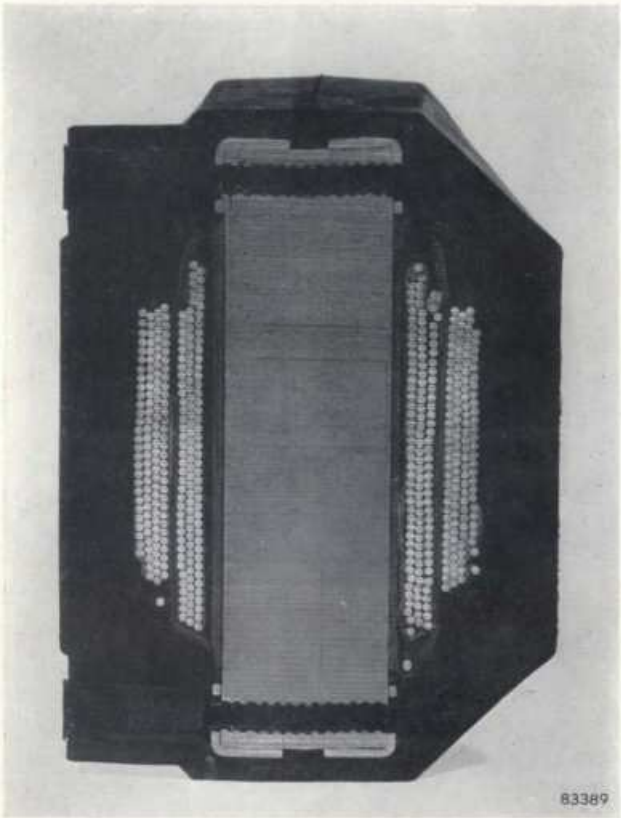


Fig. 16. De met rubber omhulde transformator van fig. 15, middendoorgezaagd. Duidelijk is te zien hoe de windingen geheel omsloten worden door rubber, dat in alle openingen is doorgedrongen.

De uitstekende kwaliteit die met deze constructie verkregen wordt, blijkt als men de transformator onderwerpt aan een proef die bestaat in een dagelijks verwarmen tot de werktemperatuur en afkoelen door onderdompeling in water. Na wekenlange herhaling van deze zware proef meet men nog isolatieweerstanden van duizenden megohms, bij een beproevingsspanning gelijk aan 3 maal de werkspanning.

---

[5]) L. C. Vipond, No drinks for transformers, Aviation Age **17**, 56, November 1952.

Samenvatting. In vliegveldlichten worden gloeilampen voor 6 tot 30 V gebruikt, die ieder op een eigen transformator zijn aangesloten. In het artikel wordt betoogd dat serieschakeling van deze transformatoren te verkiezen is boven parallelschakeling. Bij serieschakeling namelijk veroorzaakt het spanningsverlies in de voedingskabels geen ongelijkheid in lichtsterkte van de aangesloten lampen; daardoor kan men een veel dunnere kabel gebruiken en dus aanzienlijk op de kabelkosten, die een belangrijke investering vergen, bezuinigen. Een tweede voordeel van serieschakeling is de grotere betrouwbaarheid (minder invloed van overgangsweerstanden; geen veiligheid bij iedere lamp nodig).

Een geschikte stroombron voor seriesystemen is de brugschakeling van Boucherot. Twee gunstige eigenschappen hiervan zijn: de uitgangsstroom is onafhankelijk van grootte en aard der belastingsimpedantie, en bij weerstandsbelasting is de arbeidsfactor 1. Ongunstig echter is de onbepaaldheid van de stromen in de vier brugtakken. Besproken worden middelen om deze onbepaaldheid op te heffen, o.a. een kleine verstemming van de brug.

De brug van Boucherot wordt toegepast in een reeks door Philips gefabriceerde voedingstoestellen voor vliegveldbebakening, voor vermogens van 1,5 tot 25 kVA. Besproken worden o.a. een nieuw vergrendelingssysteem en de wijze waarop de uitgangsspanning begrensd wordt bij onderbreking van de uitwendige keten.

Tot slot worden de lamptransformatoren behandeld, waarvan de karakteristiek nauwkeurig bij die van het voedingsapparaat moet zijn aangepast. Een geheel met rubber geïsoleerde uitvoering is bijzonder goed bestand tegen corrosie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

HET „MÜLLER" TOESTEL UGX VOOR RÖNTGENDIAGNOSTIEK

Behalve de hulpmiddelen voor het opwekken van de röntgenstraling en voor het waarnemen van het röntgenbeeld, moet een röntgendiagnostiektoestel ook zodanige mechanische voorzieningen bevatten dat de patient in de gewenste posities voor het onderzoek kan worden gebracht. De gebruikelijke universele diagnostiektoestellen bieden hiertoe o.a. de mogelijkheid de patient te kantelen om een horizontale as die dwars staat op de richting van de röntgenstralenbundel; de röntgenbuis alsmede de waarnemingstoestellen moeten deze beweging meemaken. Bij het hier afgebeelde nieuwe toestel is van deze traditionele bewegingsmogelijkheid afgezien ten gunste van een geheel onbeweeglijk horizontaal in de ruimte gelegen röntgenstralenbundel. In plaats van het bovengenoemde kantelen heeft men bij dit toestel de mogelijkheid geschapen de patient te draaien om een andere horizontale as, nl. de richting van de centrale röntgenstraal zelf, alsmede om zijn lengte-as. Men kan aldus geheel nieuwe posities van de patient en nieuwe projectierichtingen toepassen, die voor het onderzoek van sommige organen zeer nuttig kunnen zijn.

Het door H. Verse en K. Weigel te Hamburg ontwikkelde toestel werd voor het eerst gedemonstreerd tijdens het 7de Internationale Congres voor Radiologie in Kopenhagen 1953 [1]). Het toestel zal te zijner tijd uitvoeriger in dit tijdschrift worden beschreven.

---

[1]) H. Verse en K. Weigel, Eine gerätetechnische Betrachtung zur Röntgendiagnostik, Fortschr. Röntgenstrahlen **80**, 520-524, 1954, No. 4.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!